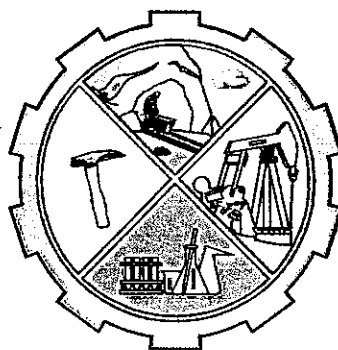


# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO EN LA  
INSTALACIÓN DE UNA PLANTA QUÍMICA PARA LA  
PRODUCCIÓN DEL BIOPOLÍMERO ÁCIDO POLILÁCTICO  
(PLA) A PARTIR DEL LACTOSUERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**Karina Mercedes Yamunaqué Chero**

**PIURA - PERÚ  
2015**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA  
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO EN LA  
INSTALACIÓN DE UNA PLANTA QUÍMICA PARA LA  
PRODUCCIÓN DEL BIOPOLÍMERO ÁCIDO POLILÁCTICO  
(PLA) A PARTIR DEL LACTOSUERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**KARINA MERCEDES YAMUNIQUE CHERO**


**PIURA - PERÚ**


**2015**

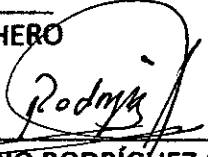
**"ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO EN LA  
INSTALACIÓN DE UNA PLANTA QUÍMICA PARA LA  
PRODUCCIÓN DEL BIOPOLÍMERO ÁCIDO POLILÁCTICO  
(PLA) A PARTIR DEL LACTOSUERO"**

**TESIS**  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**

**RESPONSABLES:**


  
Br. KARINA M. YAMUNAQUE CHERO  
TESISTA

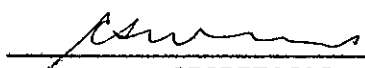
  
Ing. GUIDO TICONA OLARTE, Dr.  
ASESOR

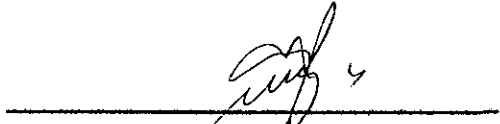
  
Ing. CLAUDIO RODRÍGUEZ GÓMEZ  
CO-ASESOR

**APROBADA POR UNANIMIDAD**

**JURADO:**

  
PRESIDENTE  
Ing. Msc. JOSÉ MOLERO LOPEZ

  
SECRETARIO  
Ing. EDUARDO SALAZAR CASTILLO

  
VOCAL  
Ing. FELIX RUÍZ ANTÓN

**PIURA - PERÚ  
2015**

## ***DEDICATORIA***

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis padres Néstor y Marthita por su amor incondicional, esfuerzo y dedicación que me brindaron desde pequeña, por enseñarme a luchar y no dejarme vencer por las adversidades de la vida y porque sé que siempre puedo contar con ustedes.

A mis hermanos Raúl y Jonathan, por su apoyo decidido sin fronteras, y en especial a mi amor Amet por estar junto a mí en los mejores y difíciles momentos de mi vida, a mi bebe Solange porque es el motor y motivo de mi vida.

***Karina Mercedes Yamunaque Chero***

## ***AGRADECIMIENTOS***

En primer lugar debo agradecer a Dios, porque es mi soporte en momentos difíciles, porque me ha dado la inteligencia y sabiduría para lograr mis objetivos. Gracias por su infinito amor, a Él sea la Gloria.

A mis padres Néstor y Martha por sus buenos consejos y enseñanzas transmitidos durante todos estos años, soy muy bendecida por tenerlos a mi lado.

A mis hermanos y abuelos, Raúl, Jonathan, papa Goyo y mama Manuela, porque saben que diariamente han sido un valuarte sumamente importante al alentar la finalización de esta tesis.

A ti esposo querido Amet, gracias a tu amor, apoyo y comprensión logre concluir el comienzo de muchos objetivos que vendrán en adelante, tú me animas a saber que puedo lograrlo.

A mi niña Solange Regina gracias a tu sonrisa y amor de bebe conviertes cada día en luz y esperanza, me das fuerza para continuar en la batalla de la vida.

A mis asesores: Ing. Guido Ticona e Ing. Claudio Rodríguez, gracias por escuchar y apoyar mis opiniones en cuanto a esta Tesis, esto lo valoraré, gracias por su confianza y amistad.

A mi Alma Mater Universidad Nacional de Piura, por formarme como profesional dentro de sus aulas.

***Karina Mercedes Yamunaque Chero***

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
GLOSARIO.....	XII
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
HIPÓTESIS.....	XVII
<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 El ácido poliláctico (PLA).....	1
1.1.1 Historia del Ácido Poliláctico.....	2
1.1.2 Polímeros.....	2
1.1.3 Estructura química de los polímeros.....	3
1.1.4 Polímeros Biodegradables (EDP).....	4
1.1.5 Biopolímeros (BPL).....	5
1.1.6 Biodegradabilidad y Biorreabsorción.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.1 Objetivos específicos.....	6
1.3 Contenido de la tesis.....	6
<b>CAPITULO II: ESTUDIO DE MERCADO .....</b>	<b>8</b>
2.1 El producto.....	8
2.1.1 Presentación del Ácido Poliláctico (PLA).....	8
2.1.2 Usos últimos del ácido poliláctico (PLA).....	9
2.1.3 Antecedentes.....	9
2.1.4 Ácido láctico: Base para polimerización .....	10
2.1.5 Propiedades - características del Ácido Poliláctico (PLA).....	11

2.2 Principales productores a nivel mundial.....	12
2.2.1 Producción del mercado lácteo peruano .....	12
2.2.2 Producción global del lactosuero.....	13
2.2.3 Comercio de productos lácteos a nivel mundial .....	15
2.2.4 Evolución del mercado de polímeros biodegradables (EDP).....	18
2.3 Productos competitivos.....	19
2.4 Estimación de la demanda futura.....	21
2.5 Estimación de la capacidad de planta.....	25
2.6 Estimación del consumo per cápita.....	25
2.7 Estimación del precio de venta .....	26
2.8 Proyecciones a futuro del biopolímero (PLA) en el Perú.....	27
<b>CAPITULO III: UBICACIÓN DE LA PLANTA.....</b>	<b>29</b>
3.1 Factores más importantes y lugares más factibles.....	29
3.2 Suministro de materia prima: Lactosuero.....	29
3.3 Accesibilidad de los mercados .....	31
3.4 Suministro de energía .....	31
3.4 Suministro de agua .....	32
3.5 Transporte.....	32
3.6 Disposición de mano de obra .....	33
3.7 Leyes reguladoras.....	33
3.8 Clima.....	34
3.9 Disposición de efluentes y/o subproductos.....	34
3.10 Evaluación por el método factores de balanceo .....	35
<b>CAPITULO IV: MATERIA PRIMA.....</b>	<b>36</b>
4.1 Materia prima: Lactosuero.....	36
4.2 Materiales y métodos experimentales.....	37
4.3 Disponibilidad de la materia prima.....	42
<b>CAPITULO V: SELECCIÓN Y DISEÑO DEL PROCESO.....</b>	<b>43</b>
5.1 Introducción.....	43
5.2 Procesos de manufactura del Ácido Poliláctico (PLA) .....	43
5.2.1 Proceso por vía química.....	43
5.2.2 Proceso por vía biotecnológica.....	44
5.2.3 Procesos de obtención del ácido poliláctico (PLA).....	45

5.3 Selección del proceso .....	46
5.4 Balance de materia y energía del proceso .....	47
5.4.1 Descripción pormenorizada del proceso.....	47
5.4.1.1 Almacenamiento de materia prima.....	47
5.4.1.2 Almacenamiento de insumos químicos.....	47
5.4.1.3 Prefiltración.....	48
5.4.1.4 Centrifugado.....	48
5.4.1.5 Tecnología de membrana por ultrafiltración-diafiltración.....	48
5.4.1.6 Fermentación bacteriológica en forma anaerobia .....	50
5.4.1.7 Obtención de lactosa a partir del lactosuero .....	50
5.4.1.8 Neutralización del ácido láctico.....	51
5.4.1.9 Acidulación para recuperar ácido láctico .....	51
5.4.1.10 Filtración y Decantación.....	51
5.4.1.11 Evaporación.....	52
5.4.1.12 Obtención del dímero lactida.....	52
5.4.1.13 Polimerización para obtención del ácido poliláctico (PLA).....	52
5.4.2 Diagrama de flujo del proceso (flow sheet).....	52
5.4.3 Diagrama de bloques del proceso .....	53
5.4.4 Balance de materia del proceso .....	53
5.4.5 Balance de energía del proceso .....	53
<b>CAPITULO VI: SISTEMA DE REACCIÓN.....</b>	<b>61</b>
6.1 Reacciones químicas .....	61
6.2 Isomerismo óptico y estereoquímica.....	62
6.3 Mecanismo de la reacción polimerización por el método ROP.....	63
6.4 Selección del catalizador para la polimerización .....	64
6.5 Cinética de reacción obtención del Ácido Poliláctico (PLA).....	66
6.5.1 Cinética de la reacción de fermentación.....	66
6.5.2 Cinética de la reacción de prepolimerización.....	70
6.5.3 Cinética de la reacción de polimerización.....	72
<b>CAPITULO VII: DISEÑO DE EQUIPOS PRINCIPALES Y AUXILIARES DEL PROCESO.....</b>	<b>74</b>



<b>CAPITULO VIII: DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA DE PLA.....</b>	<b>122</b>
8.1 Importancia de la distribución de planta .....	122
8.2 Dimensionamiento de la planta química de PLA.....	123
8.3 Diagrama de Layout de la planta química de PLA .....	123
8.4 Cimientos y estructura de la planta química de PLA .....	123
8.5 Arquitectura de la planta química de PLA .....	125
<b>CAPITULO IX: EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.....</b>	<b>127</b>
9.1 Sistemas de gestión.....	128
9.1.1 Sistema de gestión medioambiental.....	128
9.1.2 Sistema ISO.....	129
9.2 Calidad ambiental.....	129
9.2.1 Contaminación atmosférica.....	129
9.2.2 Contaminación acústica.....	130
9.2.3 Contaminación lumínica.....	130
9.2.4 Contaminación de las aguas residuales .....	130
9.2.5 Generación de efluentes en la planta química .....	131
9.3 Estudio del impacto ambiental .....	131
9.3.1 Normativa y criterios de aplicación.....	132
9.3.2 Identificación y minimización de impactos.....	133
9.3.3 Medidas correctivas.....	136
9.3.3.1 Medio atmosférico.....	136
9.3.3.2 Medio terrestre.....	136
9.3.3.3 Consumo de recursos.....	136
9.3.3.4 Paisaje .....	136
9.3.3.5 Medio socioeconómico.....	136
<b>CAPITULO X: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....</b>	<b>137</b>
10.1 Estimación de la inversión total.....	137
10.2 Estimación de la inversión del capital.....	137
10.2.1 Estimación de equipos adquiridos del proceso .....	138
10.2.2 Capital de puesta en marcha .....	141
10.2.3 Intereses .....	141
10.3 Cálculo de inversión total del proyecto .....	141
10.4 Costo total de producción.....	142

10.4.1 Materia prima e insumos químicos (Cost Raw Material).....	142
10.4.2 Tratamiento de residuos (Cost Waste Treatment).....	142
10.4.3 Mano de obra (Cost Operation Labor).....	142
10.4.4 Servicios (Cost Utility).....	143
10.4.5 Determinación del Costo Total de Producción.....	144
10.5 Indicadores financieros.....	144
10.5.1 Punto de equilibrio.....	144
10.5.2 Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR).....	145
10.5.3 Valor actual neto (VAN).....	145
10.5.4 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	146
10.5.5 Retorno sobre la inversión (ROI).....	147
10.5.6 Periodo de recuperación de la inversión (PRI).....	147
10.6 Análisis de sensibilidad.....	149
10.6.1 Costo de materia prima lactosuero.....	149
10.6.2 Precio de venta del producto ácido poliláctico (PLA) y subproductos.....	149
10.6.3 Ritmo de producción .....	150
<b>CAPITULO XI: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>151</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>153</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>154</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO CAPÍTULO II.....</b>	<b>158</b>
<b>ANEXO CAPÍTULO III.....</b>	<b>159</b>
<b>ANEXO CAPÍTULO V.....</b>	<b>160</b>
<b>ANEXO CAPÍTULO VII.....</b>	<b>175</b>
<b>ANEXO CAPÍTULO VIII.....</b>	<b>214</b>
<b>ANEXO CAPÍTULO IX.....</b>	<b>215</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diferentes tipos de estructuras de las cadenas poliméricas.....	4
Tabla 2: Empresas productoras a nivel mundial de PLA.....	10
Tabla 3: Características biodegradables del PLA.....	11
Tabla 4: Propiedades del PLA.....	12
Tabla 5: Importaciones de productos lácteos Enero - Octubre 2012.....	14
Tabla 6: Comercio exterior de productos lácteos 2006-2011.....	15
Tabla 7: Importación de productos lácteos por país de origen 2010-2011.....	16
Tabla 8: Exportación de productos lácteos por país de destino 2010-2011.....	17
Tabla 9: Consumo - Producción mundial del ácido poliláctico (PLA) en TM.....	21
Tabla 10: Variación de consumo del biopolímero ácido poliláctico (PLA).....	22
Tabla 11: Estimación de demanda futura por método de mínimos cuadrados.....	23
Tabla 12: Proyección de Demanda Futura del ácido poliláctico (PLA) hasta 2022.....	24
Tabla 13: Factores de Balanceo para ubicación de planta de ácido poliláctico (PLA)....	35
Tabla 14: Composición fisicoquímica del lactosuero dulce y ácido.....	42
Tabla 15: Composición química del lactosuero para el proceso.....	47
Tabla 16: Balance de Materia del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero..	56
Tabla 17: Balance de Energía del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero..	57
Tabla 18: Parámetros cinéticos a 48°C y pH 5.7 usando <i>Lactobacillus Bulgaricus</i> .....	68
Tabla 19: Parámetros cinéticos en la fermentación.....	69
Tabla 20: Constantes de velocidad de reacción de prepolimerización.....	70
Tabla 21: Dimensionamiento del área cubierta de la planta química de PLA.....	125
Tabla 22: Efluentes generados en la planta química de ácido poliláctico (PLA).....	131
Tabla 23: Matriz de Leopold.....	133
Tabla 24: Cálculo de impacto ambiental con promedio ponderados.....	135
Tabla 25: Índice Chemical Engineering Plant (CEPCI)).....	138
Tabla 26: Precio de equipos principales del proceso químico.....	140
Tabla 27: Tabla 26: Precio de equipos auxiliares del proceso químico.....	140
Tabla 28: Estimación de la inversión total del proyecto en la planta química para producción del PLA.....	141
Tabla 29: Costos materia prima y reactivos químicos (CRM).....	142
Tabla 30: Costo del tratamiento de efluentes en planta química (CWT).....	142
Tabla 31: Número de operadores en planta química.....	143
Tabla 32: Costo de mano de obra en planta química (COL)).....	143

Tabla 33: Costo de servicios en planta química (CUT).....	143
Tabla 34: Flujo de caja económico del proyecto para producción del PLA.....	148
Tabla 35: Análisis de sensibilidad en el precio de materia prima lactosuero.....	149
Tabla 36: Análisis de sensibilidad en el precio de venta del producto PLA y subproductos.....	149
Tabla 37: Análisis de sensibilidad en el ritmo de producción del PLA.....	150

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Clasificación de los EDP, según su origen.....	4
Gráfico 2: Capacidad mundial de producción de biopolímeros.....	12
Gráfico 3: Producción de leche en el Perú 1994-2001.....	13
Gráfico 4: Producción mundial del lactosuero (millones de TM).....	14
Gráfico 5: Importaciones de productos lácteos Enero - Octubre 2012.....	15
Gráfico 6: Importación de productos lácteos por país de origen 2010-2011.....	16
Gráfico 7: Destino de las exportaciones lácteas según monto 2011.....	17
Gráfico 8: Evolución de empresas asociadas a producción de biopolímeros.....	18
Gráfico 9: Producción mundial de biopolímeros 2012.....	19
Gráfico 10: Proyección de Demanda Futura del ácido poliláctico (PLA).....	20
Gráfico 11: Producción anual de bioplásticos (Miles Ton).....	21
Gráfico 12: Previsiones de crecimiento del mercado de los biopolímeros.....	22
Gráfico 13: Espectros del PLA en el infrarrojo medio.....	40
Gráfico 14: Diagrama de flujo del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.....	54
Gráfico 15: Diagrama de bloques del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.....	55
Gráfico 16: Curva típica de crecimiento del microorganismo.....	67
Gráfico 17: Influencia de concentración del sustrato.....	68
Gráfico 18: Determinación de los parámetros en la cinética de fermentación.....	70
Gráfico 19: Ajuste lineal del modelo cinético de prepolimerización.....	70
Gráfico 20: Ajuste lineal del modelo Pinzón a diferentes temperaturas.....	71
Gráfico 21: Dependencia de la velocidad de reacción con la temperatura.....	71
Gráfico 22: Modelo de primer orden reacción polimerización.....	73
Gráfico 23: Tendencia del índice económico CEPCI.....	139
Gráfico 24: Esquema de inversión del proyecto en la línea del tiempo.....	146
Gráfico 25: Periodo de Recuperación de la inversión.....	148

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Biodegradabilidad del PLA.....	5
Figura 2: Formula química de Ácido Poliláctico (PLA).....	8
Figura 3: Estructura molecular del Ácido Poliláctico (PLA).....	8
Figura 4: Clavos para sutura de PLA.....	9
Figura 5: Botella fabricada de PLA.....	9
Figura 6: Enantiómeros del ácido láctico.....	11
Figura 7: Ácido láctico con sus isómeros D <sup>(-)</sup> y L <sup>(+)</sup> .....	11
Figura 8: Estructura molecular del PHA.....	19
Figura 9: Localización de suministro del lactosuero en el Perú.....	30
Figura 10: El lactosuero.....	36
Figura 11: Materia prima de lactosuero analizado en el laboratorio químico (DLABSP)...	40
Figura 12: Determinación pH del lactosuero.....	41
Figura 13: Determinación proteínas del lactosuero.....	41
Figura 13: Equipo de polimerización del PLA .....	41
Figura 15: Ruta por policondensación del ácido láctico.....	45
Figura 16: Estereoisómeros del ácido láctico.....	45
Figura 17: Ruta por polimerización rompimiento de anillo (ROP).....	46
Figura 18: Principio básico de operación de una membrana .....	49
Figura 19: Operación de una membrana por ultrafiltración (UF).....	49
Figura 20: Estructura molecular de la $\beta$ -lactosa .....	51
Figura 21: Estereoisomería del ácido láctico.....	62
Figura 22: Tipos de monómero del dímero la lactida.....	63
Figura 23: Enantiómeros de monómero lactida.....	63
Figura 24: Mecanismo de reacción por polimerización por el método ROP.....	64
Figura 25: Mecanismo de polimerización por vía coordinación-inserción.....	65
Figura 26: Mecanismo general de polimerización para obtención del PLA.....	65
Figura 27: Arquitectura de la planta química PLA vista de perfil en 3D .....	126
Figura 28: Arquitectura de la planta química PLA vista superior en 3D .....	126
Figura 29: Esquema básico de un Sistema Gestión Medio Ambiental (SGMA).....	128
Figura 30: Influencias para un Sistema Gestión Medio Ambiental (SGMA).....	128

## GLOSARIO

- Termoplástico: Es un tipo de plástico que cambia de propiedades cuando se calienta y se enfría. Los termoplásticos se ablandan cuando se les aplica calor y tienen un acabado liso y duro cuando se enfrían.
- Isómeros: Se llaman isómeros a moléculas que tienen la misma fórmula molecular pero distinta estructura.
- Isómeros: Se llaman isómeros a moléculas que tienen la misma fórmula molecular pero distinta estructura.
- Copolimerización: Es la reacción para obtener una macromolécula compuesta por dos o más monómeros o unidades repetitivas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos.
- Poliéster: Es una categoría de elastómeros que contiene el grupo funcional éster en su cadena principal, surge a partir de la polimerización de un hidrocarburo denominado estireno y de otros elementos químicos.
- Alifático: Son compuestos orgánicos constituidos por carbono e hidrógeno cuyo carácter no es aromático.
- Molécula quiral: Es aquella molécula orgánica cuando su imagen en un espejo no son superponibles.
- Dímero Lactida: Es el diéster cíclico del ácido láctico obtenido por la polimerización aniónica de un ataque nucleofílico de un iniciador con carga negativa sobre el carbonilo, que da como resultado un poliéster lineal.
- Carbono asimétrico: Es aquel carbono quiral que tiene cuatro radicales diferentes, uno en cada valencia.
- Lactida: Es el diéster cíclico del ácido láctico obtenido por la polimerización aniónica de un ataque nucleofílico de un iniciador con carga negativa sobre el carbonilo, que da como resultado un poliéster lineal.
- Enantiómeros: Son aquellas moléculas que tienen las mismas propiedades químicas y físicas, a excepción de su respuesta ante la luz polarizada (actividad óptica). Por ello se les denomina isómeros ópticos.
- Ópticamente activo: Son aquellos que reaccionan frente a la luz polarizada, son moléculas que tienen muchos centros de refracción.

- Precio FOB: Es el valor de mercado en las fronteras aduaneras de un país de las exportaciones de mercaderías y otros bienes, incluidos todos los costos de transporte, de los bienes a la frontera aduanera y los derechos de exportación.
- Cenizas: Es el producto de la combustión de algún material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles, como son las sales minerales.
- Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>): Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
- Demanda Química de oxígeno (DQO): Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida.
- Espectro: Es el rango de todas las radiaciones electromagnéticas posibles resultado de la distribución característica de ese objeto o compuesto químico.
- Mezcla racémica: Es producto de una reacción química, con actividad óptica debido al isomerismo en proporciones aproximadamente equivalentes. Es decir L<sup>(+)</sup> y D<sup>(-)</sup> estereoisómeros están presentes en un 50%.
- Disacárido: Formados por la condensación (unión) de dos azúcares monosacáridos iguales o distintos mediante un enlace O-glicosídico (con pérdida de una molécula de agua) pues se establece en forma de éter siendo un átomo de oxígeno el que une cada pareja de monosacáridos.
- Chemcad 5.2.0: Es utilizado para simular y calcular cargas de calores, requerimientos de energía, equilibrios químicos y de fases, el comportamiento de equipos complejos, balances de materia, dimensionamiento de equipos, entre otros cálculos, la versión de este simulador es la indicada.
- Ácido de Lewis: Sustancia electrónicamente deficiente, capaz de aceptar un par de electrones.
- Biomasa: Es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.
- Sustrato: Es una molécula sobre la que actúa una enzima, la cual se une al sitio activo de la enzima, y se forma un complejo enzima-sustrato. El sustrato por acción de la enzima es transformado en producto y es liberado del sitio activo.



- **Lactobacillus Bulgaricus:** Está formado por bacterias Gram positivas de forma bacilar que suelen formar largas cadenas. Son capaces de fermentar la lactosa mediante una fermentación ácida que provoca una bajada del pH, por ejemplo la coagulación de la leche, mediante la desnaturalización de sus proteínas; son bacterias acidófilas que crecen en ambientes ácidos.
- **Matriz Leopold:** Es un método cuantitativo de evaluación de impacto ambiental creado en 1971. Se utiliza para identificar el impacto ambiental de un proyecto en un entorno natural.
- **Diagrama de Layout:** Es el diseño y ubicación de la distribución de las distintas áreas de proceso.
- **Arquitectura de planta química:** Es la técnica de proyectar y diseñar una planta química en sus distintas vistas isométricas en perfil 2D y 3D.
- **Análisis de sensibilidad:** Es un término financiero, muy utilizado en los proyectos para tomar decisiones de inversión, que consiste en calcular los nuevos flujos de caja y el VAN.
- **Valor Actual Neto (VAN):** Es un procedimiento que permite calcular el valor presente del proyecto para determinar la rentabilidad del determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.
- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** Es el tipo de interés en el que el VAN se hace cero. Si el TIR es alto, estamos ante un proyecto empresarial rentable, que supone un retorno de la inversión equiparable a intereses altos que posiblemente no se encuentren en el mercado.

## RESUMEN

El uso de los polímeros de la petroquímica introdujo grandes beneficios a la humanidad, pero cada vez es más evidente que su empleo ocasiona daños al ecosistema. La preocupación por el impacto ambiental de los desperdicios de estos plásticos es cada vez mayor y los métodos de disposición son limitados así como los recursos petroleros, por lo que es imprescindible encontrar sustitutos.

La preocupación mundial por el control ambiental ha incitado la búsqueda más conveniente, económica y eficiente forma de aprovechamiento de los subproductos de la industria láctea, antes de ser desechados.

El suero de leche es el subproducto más abundante de la industria láctea, es el residuo obtenido de la manufactura del queso. Este subproducto es de difícil aceptación en el mercado porque sus características no lo hacen apto para su comercialización directa como suero líquido. Debido a esto, el lactosuero es uno de los materiales más contaminantes que existen en la industria alimentaria cada 1000 litros de lactosuero generan cerca de 35 kg de demanda biológica de oxígeno (DBO) y cerca de 68 kg de demanda química de oxígeno (DQO).

Esto ha generado investigaciones para obtención de polímeros biodegradables como alternativa de los convencionales no degradables, entre los polímeros sintéticos totalmente degradables el ácido poliláctico (PLA) ha sido estudiado para emplearlo en disímiles uso por su biodegradabilidad. Los procesos de bioconversión surgen como una alternativa para el aprovechamiento de este desecho que es el lactosuero como sustrato para el crecimiento de microorganismos capaces de producir sustancias, como el ácido láctico como base para la polimerización a PLA.

El microorganismo a utilizar para la transformación del lactosuero a ácido láctico por tener en su composición lactosa es el *Lactobacillus Bulgaricus*, por su velocidad de crecimiento microbiano y de mejor obtención de rendimiento del ácido láctico.

## ABSTRAC

The use of polymers from petrochemical introduced great benefits to humanity, but it is increasingly evident that their use causes damage to the ecosystem. A concern about the environmental impact of these plastic wastes is increasing and disposal methods are limited and oil resources, so it is essential to find substitutes.

The global concern for environmental control has prompted the search more convenient, economical and efficient way to use the by-products of the dairy industry, before being discarded.

Whey is the most abundant byproduct of the dairy industry, is the residue from the manufacture of cheese. This product is difficult to market acceptance because their characteristics do not fit for direct marketing or liquid whey. Because of this, the whey is one of the most polluting materials that exist in the food industry in 1000 liters of whey generate about 35 kg of biological oxygen demand (BOD) and about 68 kg of chemical oxygen demand (COD) .

This research has led to obtain biodegradable polymers as an alternative to conventional non-degradable synthetic polymers between totally degradable polylactic acid (PLA) has been studied for use in use dissimilar biodegradability. The bioconversion processes arise as an alternative to the use of this waste is whey as a substrate for the growth of microorganisms capable of producing substances, such as lactic acid as the basis for polymerization to PLA.

The microorganism used for the transformation of the whey to lactic acid by having in its composition is *Lactobacillus Bulgaricus* lactose by microbial growth speed and better performance obtains lactic acid.

## **HIPÓTESIS**

Es factible la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) empleando como materia prima el lactosuero en el Perú.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1.EL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)**

El plástico tradicional está compuesto por un polímero denominado polietileno, sintetizado a partir del petróleo por la industria petroquímica. La carestía de este combustible fósil, su carácter contaminante y el hecho de que es una fuente que, tarde o temprano, acabará por agotarse, ha llevado a algunas partes de la industria a buscar alternativas. El ácido poliláctico (PLA), sintetizado a partir del suero de leche procedente del residuo en la producción de quesos, es una de las propuestas prometedoras. En un mundo que se está volviendo muy sensible a la necesidad de proteger nuestro medio ambiente, la habilidad de crear productos de recursos sostenibles que sirvan totalmente de abono al término de su vida útil, es una proposición emocionante y atractiva.

Se denomina biopolímeros a un tipo de plásticos derivados de productos vegetales, tales como el aceite de soja, maíz, caña de azúcar, papa o en nuestro caso a partir del lactosuero residuo procedente de la producción de quesos, a diferencia de los plásticos convencionales, derivados del petróleo. En estos últimos años se han desarrollado operaciones en planta piloto para realizarlo a gran escala para la producción económica de polímeros PLA, usados para aplicaciones de empaques de alimentos, dispositivos móviles y fibras textiles.

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los más utilizados, sin embargo aún hay mucho por hacer en cuanto a su tecnología de producción, debido a que es necesario el desarrollo de procesos menos costosos y más ecológicos para nuestro ambiente.

Esta tesis contribuye en el estudio de factibilidad para la instalación de una planta química donde se determinará el estudio de ingeniería para diseñar una planta de ácido poliláctico (PLA) siendo la capacidad de planta proyectada 210710.2 TMPA para producción de biopolímero de alta calidad, a base del lactosuero procedente de la producción de quesos.

El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino; propiedades que pueden lograrse manipulando las mezclas entre los isómeros D<sup>(-)</sup> y L<sup>(+)</sup>, los pesos moleculares y la copolimerización.

### **1.1.1. Historia del Ácido Poliláctico**

El ácido poliláctico (PLA) no es un material nuevo, se sintetiza hace décadas. En 1932, Wallace Carothers, científico de la empresa Dupont, produjo un producto de poco peso molecular calentando el ácido láctico en vacío. En 1954, después de otros refinamientos, Dupont patentó el proceso de Carothers.

El costo de producción del monómero ha sido un impedimento al desarrollo extenso del polímero. Debido a los altos costos, el consumo de PLA se ha centrado principalmente en aplicaciones médicas. Recientemente, se ha desarrollado avances en la fermentación de la glucosa, esto ha bajado dramáticamente el costo de producir ácido láctico y aumentado notoriamente el interés del polímero.

Cargill, fue una de las primeras compañías en desarrollar extensivamente los ácidos polilácticos. Cargill empezó a investigar la tecnología de la producción del PLA en 1987, y comenzó la producción de cantidades correspondientes a una planta piloto en 1992.

En 1997, después de una investigación de 15 meses, Cargill formó una empresa Join Venture con Dow Chemical Company, inc., creando LLC de los polímeros Cargill Dow (CDP).

La Join Venture se dedica a producción y comercialización del PLA, fue formalmente lanzada como Nature Works™ PLA technology en 2001.

La construcción de una planta con capacidad de producción a gran escala fue terminada recientemente en Blair, Nebraska. La planta de Nebraska será capaz de producir hasta 140000 toneladas del PLA por año, a partir del maíz. Hay también planes para construir una planta adicional en Europa en un futuro próximo. La apertura de la planta en Nebraska ampliará notoriamente el mercado, haciendo del PLA un polímero disponible a escala comercial.

### **1.1.2. Polímeros**

La palabra polímero se deriva del griego poli y meros, que significa mucho y partes respectivamente. El nombre se originó debido a que los polímeros son cadenas largas de moléculas de alto peso molecular, por esta razón también el término “macromoléculas” es frecuentemente utilizado.

Los primeros polímeros utilizados fueron productos naturales especialmente de algodón, maíz proteínas y lanas. A principios del siglo XX se comenzaron a fabricar los polímeros sintéticos, como la bakelita y el nylon.

Los polímeros pueden clasificarse de diferentes maneras: en función de su origen, por su comportamiento térmico mecánico, por composición química y relación producción-costos.

➤ **Por su origen:** Dentro del primer grupo lo forman los polímeros naturales que se encuentran los productos de los reinos vegetal, animal (polisacáridos, grasas, etc.) y mineral (grafito), así como productos derivados de ellos. En el segundo grupo los polímeros sintéticos se encuentran los derivados del petróleo.

➤ **Por su comportamiento térmico mecánico:** Los primeros son los termoplásticos, son aquellos materiales que se pueden ablandar, procesar y reprocesar mediante la aplicación de temperatura y presión; permitiendo darles la forma deseada, más del 80% de los plásticos son de este tipo. Por otra parte los termofijos, son materiales que no se transforman con la aplicación de calor y presión, ya que tiene estructuras reticulares que no se modifican por estos medios.

➤ **Por su composición química:** Poliolefinas; polietileno (PE), polipropileno (PP), polibutadieno (PB). Polímeros de cloruro de vinilo (Policloruro de vinilo no plastificado o PVC rígido, Policloruro de vinilo plastificado o PVC flexible). Polímeros de estireno; poliestireno (PS), polibutadieno-estireno (SBR), poliacrilonitrilobutadieno-estireno (ABS). Polímeros fluorados; polifluoruro de vinilo (PVF), polidifluoruro de vinilo (PVDF). Heteropolímeros; poliamidas (PA), polióxido de metileno (POM), policarbonatos (PC).

➤ **Por su relación producción-costos:** Se divide en tres grupos:

- Los polímeros de gran tonelaje; son los polímeros básicos (también llamados commodities) de gran volumen de producción y de bajo precio, los principales son el polietileno, poliestireno y policloruro de vinilo.
- Los polímeros de ingeniería; son materiales procesables que pueden ser transformados en productos de dimensiones precisas y estables, con propiedades mecánicas de alto desempeño.
- Los polímeros de especialidad; son polímeros de ingeniería con propiedades especiales de superficie, optoelectrónicas, conductividad eléctrica, etc.

### **1.1.3. Estructura química de los polímeros**

Los enlaces químicos de los polímeros son principalmente covalentes primarios; C-C y C-H, C-O, C-N. Pueden aparecer como isómeros dobles enlaces, carbonos terciarios o cuaternarios, estructuras tipo anillos, etc. La estructura química básica, incluyendo los grupos terminales, determina el comportamiento químico, esto es resistencia a sustancias como ácido, bases y solventes orgánicos. (Ver Tabla 1)

Tabla 1. Diferentes tipos de estructuras de las cadenas poliméricas

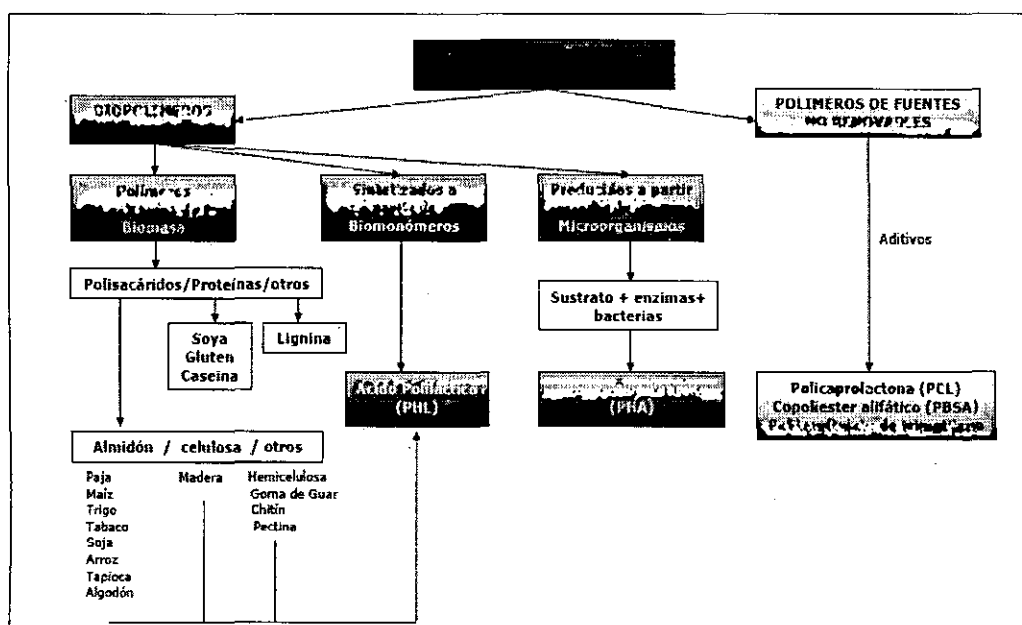
Cadenas Lineales	
$-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-O-$	Igual composición química de las cadenas, <i>homopolímero</i>
$-O-X-O-X-X-O-O-X-X-O-O-X-$	Diferente composición química, <i>copolímero al azar</i>
$-X-X-X-X-O-O-O-O-X-X-X-X-$	Diferente composición química, <i>copolímero en bloque</i>
$-X-O-X-O-X-O-X-O-X-O-X-O-$	Diferente composición química, <i>Copolímero alternado</i>
$O-O-O-X-X-X-*-*-*$	Diferente composición química, <i>terpolímero</i>
Cadenas Ramificadas	
	Homopolímero, por ejemplo el polietileno de baja densidad
	Copolímero injertado
Cadenas Entrecruzadas	
	Grado de entrecruzamiento bajo (elastómeros y geles, por ejemplo el hule natural vulcanizado y los geles de estireno-divinil benceno)
	Grado de entrecruzamiento alto: termofijos, por ejemplo las resinas fenólicas

Fuente: Angulo Sánchez, "Caracterización Físicoquímica de Polímeros", Pág. 15-19

#### 1.1.4. Polímeros Biodegradables (EDP)

Denominados plásticos biodegradables (EDPs, Environmentally Degradable Polymers and Plastics), vienen definidos en ISO (International Standard Organization) que los define como "aquellos plásticos que se degradan por la acción de microorganismos (bacterias, hongos y algas)". A continuación se expone un gráfico de la clasificación de los EDP, según su origen. (Ver Gráfico 1)

Gráfico 1. Clasificación de los EDP, según su origen



Fuente: Asociación Española de Industriales de Plásticos (ANAIP), 1987



### 1.1.5. Biopolímeros (BPL)

Debido a que los materiales plásticos de uso masivo derivados del gas o petróleo tienen una gran inercia química no pueden ser atacados por los microorganismos presentes en el medio ambiente por lo cual no son biodegradables. No obstante existen plásticos biodegradables que son obtenidos de fuentes de materias primas renovables como el almidón de maíz, azúcares, aceites vegetales, etc., se denominan biopolímeros que son verdaderamente biodegradables en condiciones controladas. Por lo tanto un material biodegradable es un material capaz de desarrollar una descomposición aeróbica o anaeróbica por acción de microorganismos. Algunos biopolímeros son poliésteres como los copolímeros del tipo polihidroxibutirato (PHB), polihidroxivalerato (PHV), pululano (polisacárido), el ácido poliláctico (PLA).

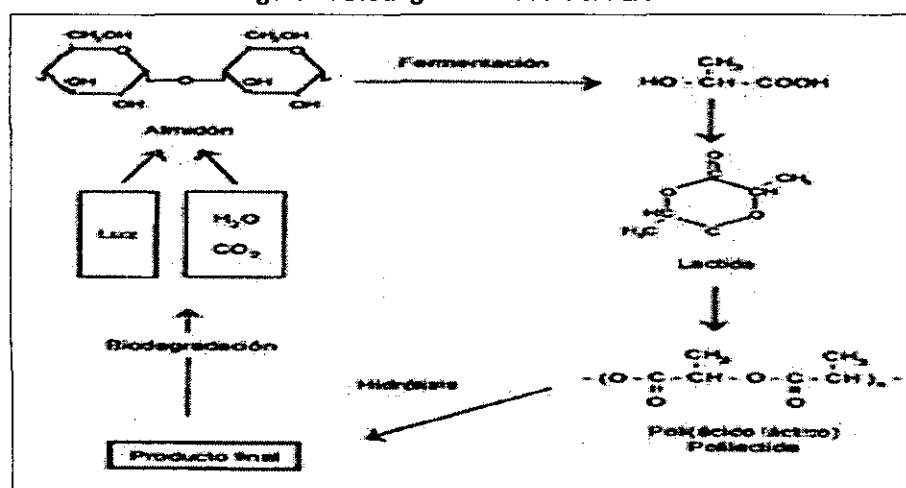
### 1.1.6. Biodegradabilidad y Biorreabsorción

En presencia de PLA, los microorganismos (hongos y bacterias) colonizan la superficie del polímero y son capaces de segregar enzimas que rompen en pequeños fragmentos el polímero; la colonización de la superficie depende de factores tales como la tensión superficial, porosidad, textura superficial y accesibilidad a las cadenas de polímeros.

Los grupos hidrófilos de las enzimas ( $\text{COOH}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NH}$ ) atacan los grupos ésteres de las cadenas de polímeros mediante reacciones de hidrólisis seguida por reacciones de oxidación, de esta forma reducen el polímero a fragmentos de peso molecular inferiores a 500 g/mol, los cuales pueden ser digeridos por los microorganismos. (Ver Figura 1)

En los tejidos vivos, el PLA se despolimeriza totalmente por hidrólisis química. La degradación del polímero comienza por una pérdida de peso molecular.

Figura 1. Biodegradabilidad del PLA



Fuente: CHEM SYSTEMS. Biotech Routes to Lactic Acid/Polylactic acid. Report Alert. Chem system, Jun 2002

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar la factibilidad técnico-económico en la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- ✓ Caracterizar las propiedades del lactosuero con el fin de evaluar sus cualidades para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).
- ✓ Diseñar el proceso de obtención del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero para la instalación de una planta química en el Perú.
- ✓ Realizar los balances de materia y energía del diseño de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).
- ✓ Determinar el rendimiento del proceso para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.
- ✓ Diseñar los equipos principales y auxiliares de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).
- ✓ Realizar la evaluación económica de viabilidad en la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).
- ✓ Identificar los impactos ambientales en la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

## **1.3 CONTENIDO DE LA TESIS**

Tenemos en el Capítulo I: El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero sintetizado a partir del lactosuero procedente del residuo en la producción de quesos, siendo una de las propuestas más prometedoras. Se definen términos relacionados con respecto al biopolímero ácido poliláctico (PLA). Además se definen los objetivos generales y específicos del Proyecto de la Tesis. En el Capítulo II: El estudio de mercado, se inicia el proyecto para lograr el reto en desarrollar la tecnología necesaria en el Perú, adaptación de los productos en procesos reales y competitivos que supongan una verdadera revolución en el mercado mundial; basándonos al consumo, demanda y capacidad de planta del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

En el Capítulo III: La ubicación de la planta, tiene como objetivo describir los factores de mayor importancia que permiten seleccionar el área geográfica, con el fin de localizarla en la posición económicamente más favorable.

Para la ubicación de la Planta se ha aplicado el método de los Factores de Balanceo, evaluando la incidencia de cada uno de ellos. Para este método el lugar donde será mejor la ubicación de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero es en la ciudad de Cajamarca la zona Norte- Sierra del Perú.

En el Capítulo IV: Materia Prima, se define el concepto del lactosuero, que representa el 90% peso de la leche utilizada para la elaboración del queso. El suero de leche (lactosuero) es uno de los residuos más representativos de la industria lechera y uno de los contaminantes más severos que existen a nivel ambiental, también se determina los métodos experimentales para determinar la composición química y ensayos realizados al lactosuero.

En el Capítulo V: Selección y Diseño del proceso, en este capítulo se evaluará más eficientemente el proceso de ácido poliláctico (PLA), la selección correcta del proceso, descripción pormenorizada y en forma detallada; incluyendo el diagrama de flujo del proceso, diagrama de bloques, su balance de materia y energía en los equipos principales y auxiliares.

En el Capítulo VI: Sistema de reacción, se hace un análisis de la reacción química del proceso, la síntesis del biopolímero ácido poliláctico (PLA), su naturaleza química, la selección del catalizador, el mecanismo de la reacción, las condiciones termodinámicas, parámetros y cinética de la reacción en el proceso en la obtención del ácido poliláctico (PLA).

En el Capítulo VII: Diseño de equipos principales y auxiliares del proceso, aquí se detallan las características de operación, función y especificaciones técnicas de los equipos principales y auxiliares del proceso para obtención del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.

En el Capítulo VIII: Evaluación de impacto ambiental, en este capítulo se mostrarán los sistemas de gestión ambiental, la evaluación del impacto ambiental de la planta química para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) determinadas en la Matriz de Leopold, la identificación y minimización de impactos ambientales del proceso.

En el Capítulo IX: Evaluación económica, en este capítulo se evaluará de forma detallada las diferentes variables e índices económicos necesarios para determinar la rentabilidad del proyecto para la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) y determinar la factibilidad del Proyecto de la Tesis.

En el Capítulo IX: Análisis e interpretación de resultados, se determina el análisis técnico con respecto a los resultados obtenidos del Proyecto de la Tesis y la factibilidad económica en la instalación de una planta química en el Perú para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.

## CAPÍTULO II

### ESTUDIO DE MERCADO

La escasez y encarecimiento del petróleo, junto con un aumento de las regulaciones medioambientales, actúan de forma sinérgica para promover el desarrollo de nuevos materiales y productos más compatibles con el medioambiente e independientes de los combustibles fósiles. La obtención de productos químicos y nuevos materiales a partir de fuentes renovables no es una idea nueva. El reto está en desarrollar la tecnología necesaria, adaptación de los productos en procesos reales y competitivos que supongan una verdadera revolución en el mercado mundial; basándonos al consumo, demanda y capacidad de planta del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

#### 2.1. EL PRODUCTO

##### 2.1.1. Presentación del Ácido Poliláctico (PLA)

El poliéster alifático obtenido a partir de recursos renovables el más importante a escala industrial es el PLA. El ácido poliláctico (PLA), es un poliéster termoplástico que forma parte de los  $\alpha$ -hidroxiácidos; su precursor es el ácido láctico, molécula quiral. La lactida, monómero del ácido poliláctico, es una molécula que existe bajo cuatro formas: L, D, meso y racémica. (Ver Figuras 2 y 3)

Figura 2. Formula química de Ácido Poliláctico (PLA)

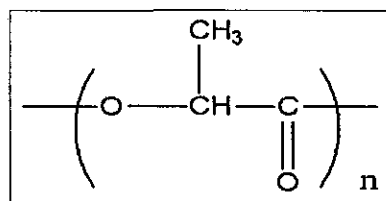
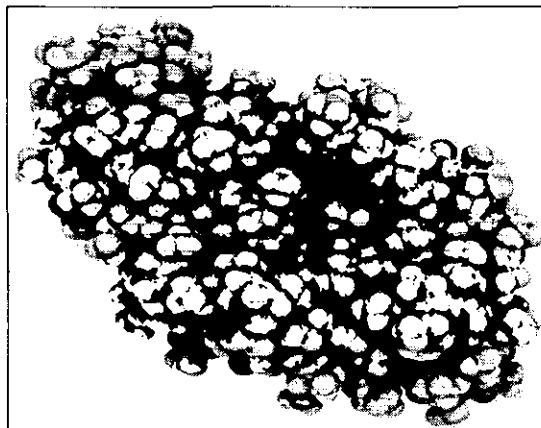


Figura 3. Estructura molecular del Ácido Poliláctico (PLA)



### 2.1.2. Usos últimos del ácido poliláctico (PLA)

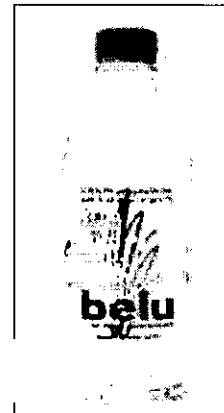
El ácido poliláctico (PLA) es utilizado ampliamente en la industria alimenticia, química, farmacéutica, plástico, textil, la agricultura, la alimentación animal, entre otros:

- ✓ En los tejidos vivos, el PLA se despolimeriza totalmente por hidrólisis química. Esta característica hace que el PLA sea ampliamente utilizado para la producción de hilo para sutura, implantes, cápsulas para la liberación lenta de fármacos, prótesis.
- ✓ El PLA se utiliza en materiales mecánicos como clavos en la unión de ligamentos, en la reparación de meniscos, suturas, tornillos, en la fijación de fracturas y cirugía maxilofacial, cardiovascular y fármacos de lenta liberación.
- ✓ En ingeniería de tejidos para la regeneración de células de piel, hepáticas, cardiovasculares y recientemente de cartílago y óseas. (Ver Figura 4)
- ✓ En la industria alimenticia en empaque alimentos, juguetería, envoltura de dulces y de flores, en la elaboración de cajas, envases para leche, botellas de refrescos, botellas de aceite. El PLA es un biopolímero que veremos mucho en el futuro por ser una verdadera innovación en materiales de empaquetado para alimentos. (Ver Figura 5)

**Figura 4. Clavos para sutura de PLA**



**Figura 5. Botella fabricada de PLA**



### 2.1.3. Antecedentes

El consumo de PLA en 2007 fue de alrededor de 60 mil toneladas y, hasta el momento, sólo el 30% del ácido láctico producido se utiliza para fabricar PLA. El productor más importante es sin dudas el de NatureWorks (Nebraska, EE.UU) con una capacidad de 140000 TM /año y los precios de venta (por kilogramo) entre los €2,5 y los €5,5. Otras empresas productoras de PLA son: Teofan (Alemania), Hycail (Holanda), Mitsui Chemicals Inc (Japón).

Pero no son las únicas también cabe destacar a Sterling Chemicals (EE.UU.), Musashino Chemical (Japón), CCA biochemical BV Netherlands con plantas en (Europa, Brasil y EE.UU).

A continuación se expone una tabla de las más importantes empresas productoras a nivel mundial de PLA. (Ver Tabla 2)

**Tabla 2. Empresas productoras a nivel mundial de PLA**

<b>Empresa</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Producto comercial</b>
<b>Cargill LCC</b>	EE.UU.	NatureWorks
<b>Mitsubishi</b>	Japón	Ecolojú
<b>Chronopol</b>	EE.UU.	Heplon
<b>Hycail</b>	Holanda	Hycail HM, LM
<b>Toyota</b>	Japón	Toyota Eco-Plastic
<b>Purac Biomaterials</b>	Holanda	Purasorb*
<b>Durect</b>	EE.UU.	Lactel*
<b>Shimadzu</b>	Japón	Lacty*
<b>Total &amp; Galactic</b>	Bélgica	Futero**
<b>Treofan</b>	Holanda	Treofan
<b>Mitsui Chem</b>	Japón	Lacea

Fuente: <http://www.purac.es/products.html>. Productos PURAC, 2012

\*Especialidades medicinales

\*\* En etapa de proyecto

#### **2.1.4. Ácido láctico: Base para polimerización**

El ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico,  $\text{CH}_3\text{-CHOH-COOH}$ ); contiene un átomo de carbono asimétrico que es el principio de dos enantiómeros distintos, es decir que son las imágenes uno del otro en un espejo y es el hidroxíácido más sencillo que existe. (Ver Figura 6)

Fue descubierto hacia 1780 por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele pero solo fue obtenido a escala industrial hacia 1880 en Estados Unidos por Charles Avery. Puede producirse por fermentación anaeróbica de sustratos orgánicos, con microorganismos como hongos y bacterias.

El ácido láctico obtenido de la fermentación es ópticamente activo, por lo que la producción específica de los isótopos  $\text{L}^{(+)}$  o  $\text{D}^{(-)}$  puede determinarse utilizando un lactobacilo apropiado. (Ver Figura 7)

Figura 6. Enantiómeros del ácido láctico

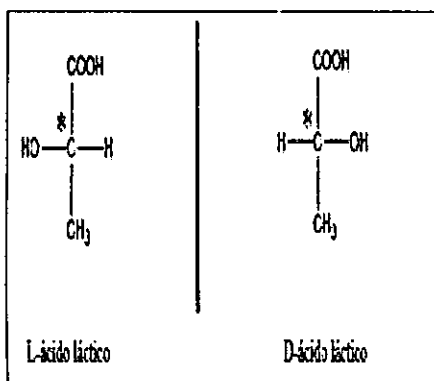
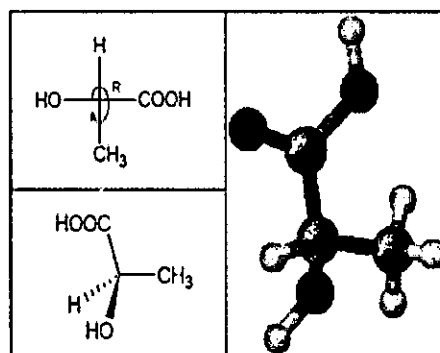


Figura 7. Ácido láctico con sus isómeros D<sup>(-)</sup> y L<sup>(+)</sup>



### 2.1.5. Propiedades - características del Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA es un polímero permanente e inodoro, es claro y brillante como el poliestireno (se utiliza para fabricar baterías y juguetes). Resistente a la humedad y a la grasa. Tiene características de barrera del sabor y del olor similar al plástico de polietileno tereftalato, usado para las bebidas no alcohólicas y para otros productos no alimenticios.

Los polímeros derivados de los monómeros D<sup>(-)</sup> y L<sup>(+)</sup> del ácido poliláctico son materiales semicristalinos, mientras que el D, L-PLA es siempre amorfo. Las diferencias en cristalinidad de D, L-PLA y L-PLA tienen importantes implicaciones tanto en las propiedades mecánicas como en el tiempo de degradación del polímero.

La fuerza extensible y el módulo de elasticidad del PLA son comparables al polietileno. Pero es más hidrofílico que el polietileno, tiene una densidad más baja. Es estable a la luz U.V, dando como resultado telas que no se decoloran. Su inflamabilidad es demasiado baja.

En la información que se muestra en la tabla se puede apreciar como el PLA parece una fibra excelente con las credenciales técnicas para sustituir al polipropileno obtenido a partir de una ficha técnica extraída del catálogo comercial de NatureWorks. (Ver Tabla 3)

Tabla 3. Características biodegradables del PLA

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.25	1.27	1.51	1.52	1.98
Punto de fusión (°C)	120-170	170	Ninguno	Ninguno	260
Cuenta (dtex)	1.7 (e.g.)	1.7	1.7	1.7	1.7
Tenacidad (cN/tex)	50	25-45	20-25	40-45	35-65
Alargamiento (%)	35	N/A	18-22	14-16	15-40
Recobro de la humedad (%)	0.4 - 0.6	0.48	13	12	0.4

Fuente: Anderson JM, Shive MS. Biodegradation and Biocompatibility of PLA, Pág. 5-24

Las propiedades físicas, mecánicas, farmacéuticas y reabsorción dependen de la composición del PLA, de su peso molecular y su cristalinidad. La temperatura de procesamiento está entre 60 a 125°C y depende de la proporción de D<sup>(-)</sup> o L<sup>(+)</sup> ácido láctico en el polímero.

Sin embargo el PLA puede ser plastificado con su monómero o alternativamente con ácido láctico oligomérico y esto permite disminuir la temperatura de transición vítrea (Tg). (Ver Tabla 4)

**Tabla 4. Propiedades del PLA**

Masa Molecular (Kda)	% Cristalinidad	Viscosidad h (dL/g)	Densidad r (g/cm <sup>3</sup> )
L-PLA. 50 a 756	15 a 74	0,61 a 8,2	1,25
D.L. PLA. 21 a 550	0 (amorphe)	0,25 a 2,01	1,29
PLA-PGA. 20 a 145	46 a 52	0,5 a 1,6	1,50 a 1,64

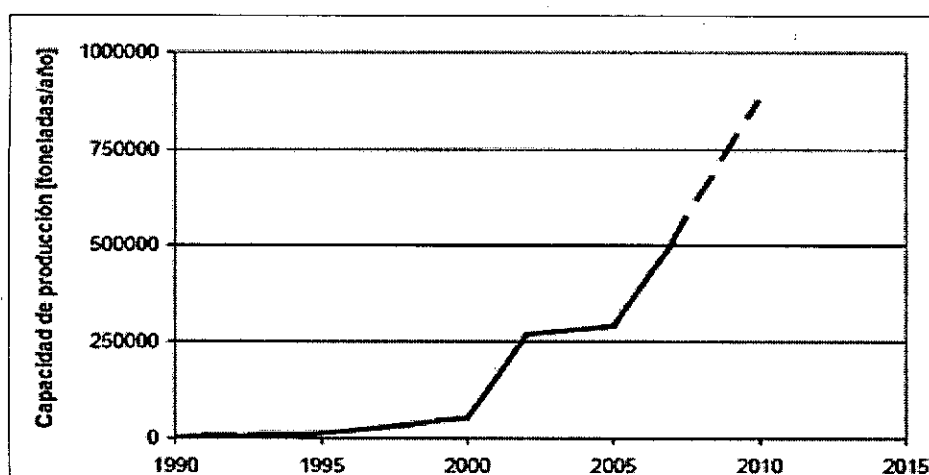
Fuente: URIBE, M; MEHRENBARGER, P. "Los polímeros: Síntesis y Caracterización". Limusa, 1990. Pág. 67-69

## 2.2. PRINCIPALES PRODUCTORES A NIVEL MUNDIAL

Los biopolímeros se fabrican actualmente con una capacidad total instalada de alrededor de 300000 ton/año, por lo que sus costos de desarrollo son altos y todavía no existe el beneficio de las economías de escala. (Ver Gráfico 2)

La variedad de productos actualmente disponible cubre aproximadamente el 5 al 10% del mercado de plásticos. Su porción del mercado es actualmente inferior al 1% (se estima un consumo de 50000 ton/año en Europa).

**Gráfico 2. Capacidad mundial de producción de biopolímeros**



Fuente: <http://www.european-bioplastics.org>

### 2.2.1. Producción del mercado lácteo peruano

Se analiza la industria láctea y sus productos derivados, desde el acopio de la leche hasta la transformación en sus productos terminados.

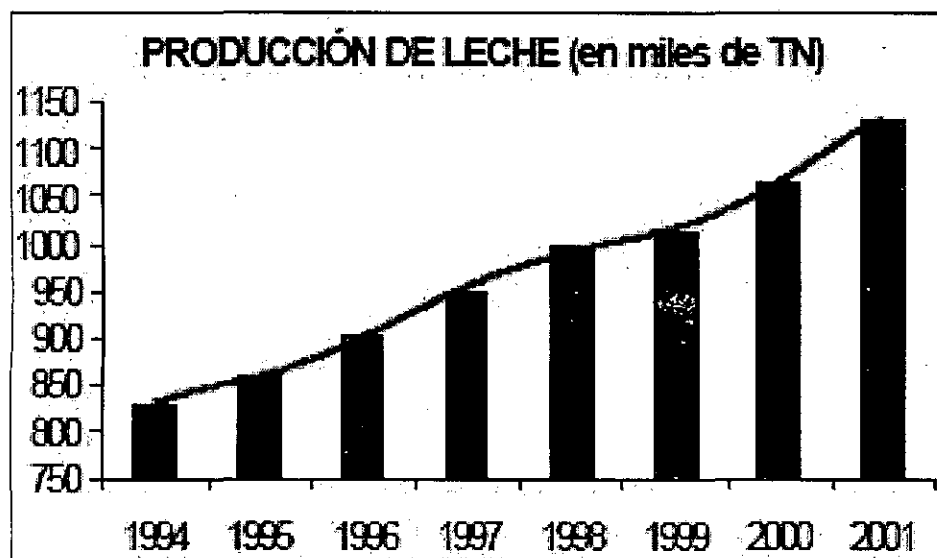


Las ventas totales de la industria se estiman en alrededor de \$800 millones anuales. En términos de valor bruto de producción, el sector lácteo contribuye con el 1.38% del PBI manufacturero y con 0.2% del PBI total.

La industria láctea produce diversos bienes: leche fresca pasteurizada, leche evaporada, leche cultivada, mantequilla, quesos, yogurt, crema de leche y el lactosuero. Es importante destacar que la producción de leche ha venido creciendo constantemente en los últimos 10 años a tasas anuales superiores al 3.7%, debido a las inversiones en expansión de los establos por parte de los ganaderos y en extensión de las redes de acopio por parte de los industriales. La producción de leche en el Perú se realiza principalmente en las denominadas cuencas ganaderas: Norte, Centro y Sur. Las dos primeras concentran la mayor producción, habiendo incrementado su producción en 16.6% y 13.9%, respectivamente.

Dicho incremento se debe a la instalación de nuevas plantas de procesamiento, como fue la puesta en marcha en 1999 de la planta Gloria en Huachipa, Carnilac S.A. en Cajamarca y Bella Holandesa en Lurín. Adicionalmente, Laive S.A. (Ver Gráfico 3)

**Gráfico 3. Producción de leche en el Perú 1994-2001**



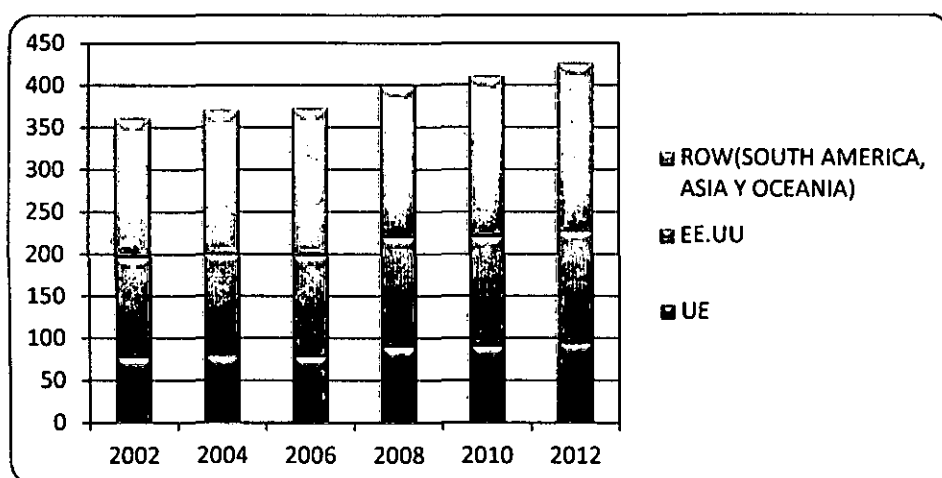
Fuente: Minag

Elaboración: Estudios Económicos - Banco Wiese Sudameris

### **2.2.2. Producción global del lactosuero**

La producción global de lactosuero, tal como se muestra en el gráfico 5 ascendió a 210 millones de toneladas en el año 2008, mostrando un crecimiento del orden del 2% entre 2002 y 2008. La Unión Europea (UE) y los EE.UU producen alrededor del 70% del volumen mundial de este producto. (Ver Gráfico 4)

**Gráfico 4. Producción mundial del lactosuero (millones de TM)**



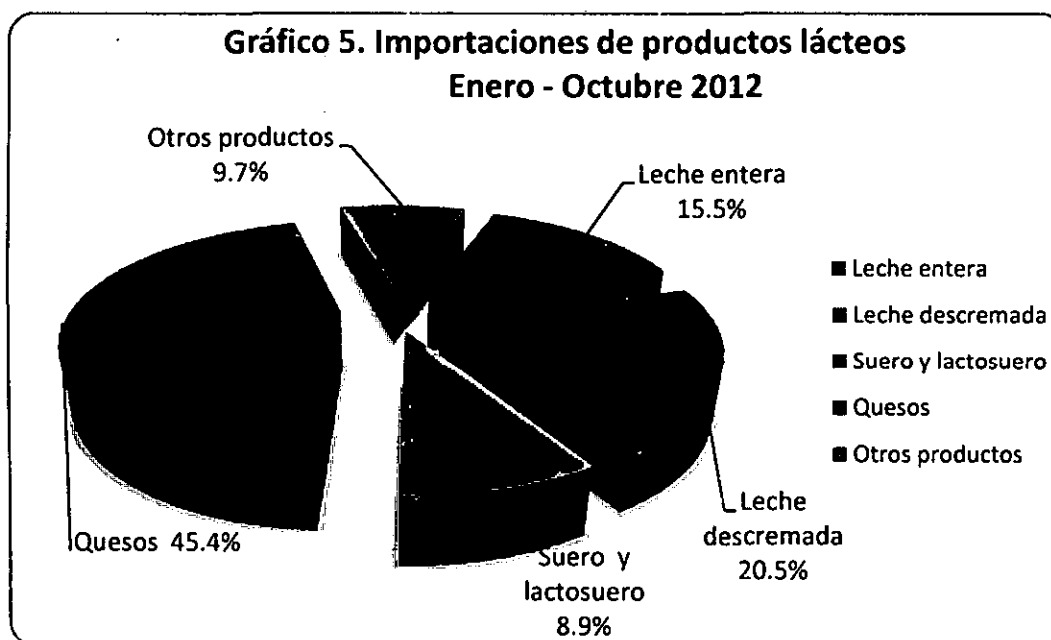
Elaboración propia Fuente basada en: <http://www.european-bioplastics.org>

En la siguiente Tabla 5 se determina las importaciones de productos lácteos en los períodos de Enero hasta Octubre 2012 en el Perú con sus respectivas producciones (TM) y precios CIF. (Ver Gráfico 5)

**Tabla 5. Importaciones de productos lácteos Enero - Octubre 2012**

Importaciones de productos lácteos Enero - Octubre 2012			
Productos	Volumen (TM)	Valor Miles de US\$ CIF	Precio medio US\$ / ton
Leche entera	5741	21236	3699
Leche descremada	8954	28135	3142
Suero y lactosuero	5606	12257	2187
Quesos	13683	62398	4560
Otros productos	5243	13293	2535
<b>Total lácteos</b>	<b>39227</b>	<b>137319</b>	

Fuente: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas.



Fuente: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas.

### 2.2.3. Comercio de productos lácteos a nivel mundial

En el año 2011 se registró un significativo aumento anual de 54% en el monto de los productos lácteos importados, los cuales subieron desde US\$ 73.3 millones en el año 2010, a US\$ 113.0 millones. Las internaciones de leche en polvo descremada y quesos explican el 67.2% de dicho monto. Los principales países de origen son Argentina, con una participación de un 49.1%, EE.UU. (27.2%) Nueva Zelanda (6.7%), Uruguay (4.2%), y Brasil (3.6%). Le siguen en orden de importancia, Perú, Francia, Holanda, Dinamarca y otros diez países más. (Ver Tabla 6)

Tabla 6. COMERCIO EXTERIOR DE PRODUCTOS LÁCTEOS 2006-2011				
AÑO	Importaciones		Exportaciones	
	Valor (miles US\$ CIF)	Variación ( % )	Valor (miles US\$ FOB)	Variación ( % )
2006	78047	-0.6	121293	6.1
2007	62710	-19.7	173326	42.9
2008	87571	39.6	226339	30.6
2009	63318	-27.7	129440	-42.8
2010	73392	15.9	159100	22.9
2011	113028	54	199560	25.4

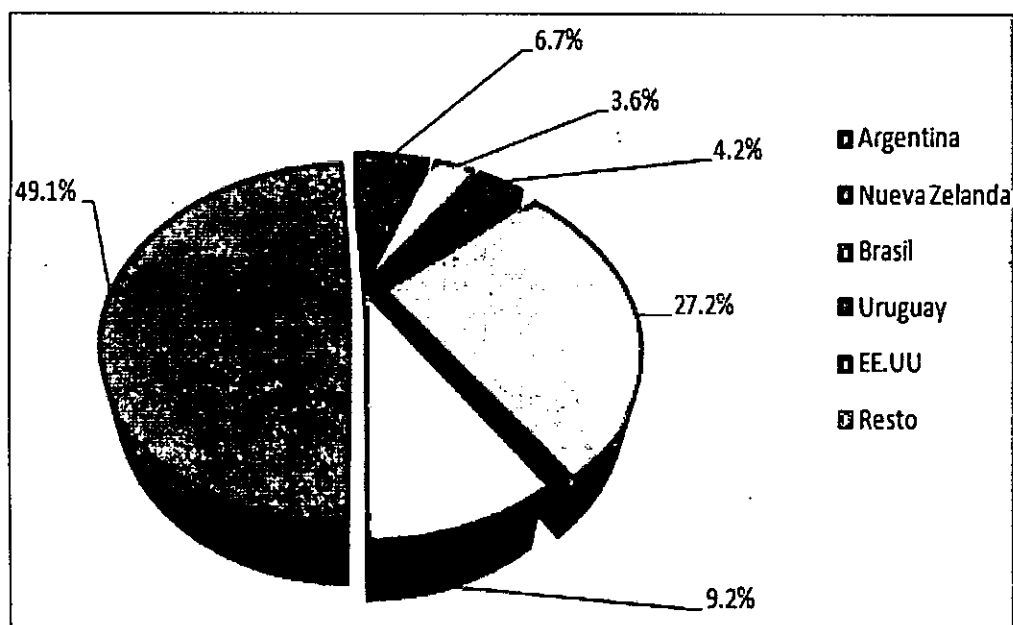
Fuente: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas.

En la Tabla 7 y Gráfico 6 muestran a continuación las importaciones de productos lácteos por cada país a nivel mundial en los años de 2010 – 2011.

<b>Tabla 7. IMPORTACIÓN DE PRODUCTOS LÁCTEOS POR PAÍS DE ORIGEN 2010-2011</b>				
<b>PAÍS</b>	<b>Valor (miles US\$ CIF)</b>		<b>Variación anual (%)</b>	<b>Participación (%)</b>
	<b>2010</b>	<b>2011</b>		
<b>Total</b>	<b>73392</b>	<b>113028</b>	<b>54.0</b>	<b>100.0</b>
<b>Argentina</b>	<b>37886</b>	<b>55509</b>	<b>46.5</b>	<b>49.1</b>
<b>Estados Unidos</b>	<b>18479</b>	<b>30765</b>	<b>66.5</b>	<b>27.2</b>
<b>Nueva Zelanda</b>	<b>2192</b>	<b>7588</b>	<b>246.2</b>	<b>6.7</b>
<b>Uruguay</b>	<b>4342</b>	<b>4714</b>	<b>8.6</b>	<b>4.2</b>
<b>Brasil</b>	<b>3995</b>	<b>4089</b>	<b>2.4</b>	<b>3.6</b>
<b>Perú</b>	<b>1808</b>	<b>2131</b>	<b>17.9</b>	<b>1.9</b>
<b>Canadá</b>	<b>332</b>	<b>1593</b>	<b>380.1</b>	<b>1.4</b>
<b>Francia</b>	<b>1366</b>	<b>1557</b>	<b>14</b>	<b>1.4</b>
<b>Alemania</b>	<b>26</b>	<b>1288</b>	<b>4792.30</b>	<b>1.1</b>
<b>Holanda</b>	<b>748</b>	<b>1179</b>	<b>57.7</b>	<b>1.0</b>
<b>Otros países</b>	<b>2218</b>	<b>2615</b>	<b>17.09</b>	<b>2.4</b>

Fuente: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas

**Gráfico 6. Importación de productos lácteos por país de origen 2010-2011**

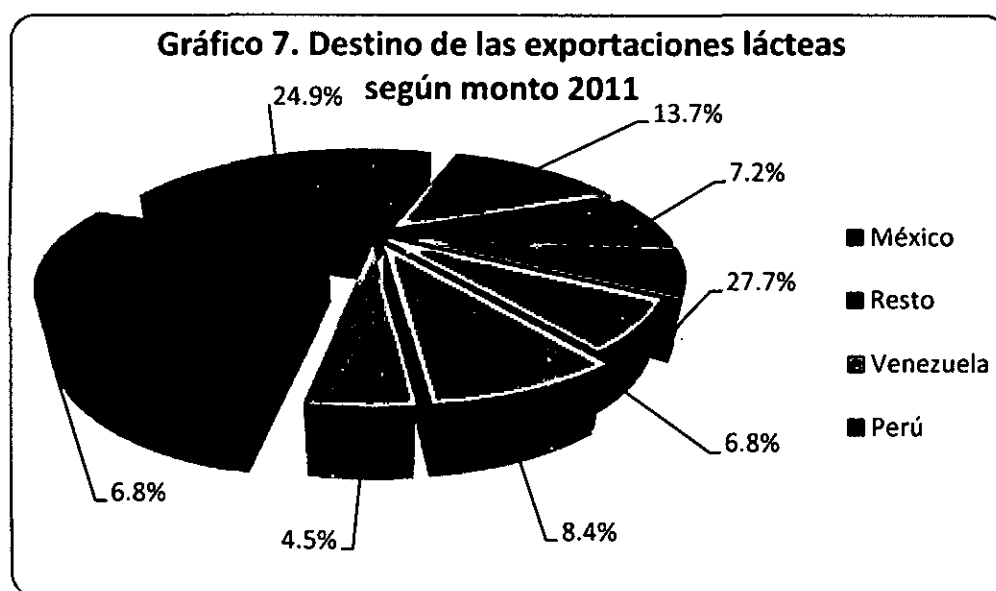


Fuente: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas

En la Tabla 8 y Gráfico 7 muestran las exportaciones de productos lácteos por cada país a nivel mundial en los años de 2010 – 2011.

<b>Tabla 8. EXPORTACIÓN DE PRODUCTOS LÁCTEOS POR PAÍS DE DESTINO 2010-2011</b>				
<b>PAIS</b>	<b>Valor (miles US\$ FOB)</b>		<b>Variación anual (%)</b>	<b>Participación (%)</b>
	<b>2010</b>	<b>2011</b>		
<b>Total</b>	<b>159100</b>	<b>199560</b>	<b>25.4</b>	<b>100.0</b>
<b>México</b>	60493	55197	-8.8	27.7
<b>Venezuela</b>	24378	27255	11.8	13.7
<b>Brasil</b>	10639	16763	57.6	8.4
<b>Perú</b>	15414	14427	-6.4	7.2
<b>Estados Unidos</b>	12133	13543	11.6	6.8
<b>Colombia</b>	1321	13536	924.6	6.8
<b>China</b>	4824	8775	81.9	4.4
<b>Corea del Sur</b>	1525	9025	491.8	4.5
<b>Costa Rica</b>	7502	8507	13.4	4.3
<b>Cuba</b>	3809	4687	23.1	2.3
<b>Argelia</b>	2724	3407	25.1	1.7
<b>Ecuador</b>	2218	2615	17.9	2.4
<b>Otros países</b>	12333	20453	40	10.2

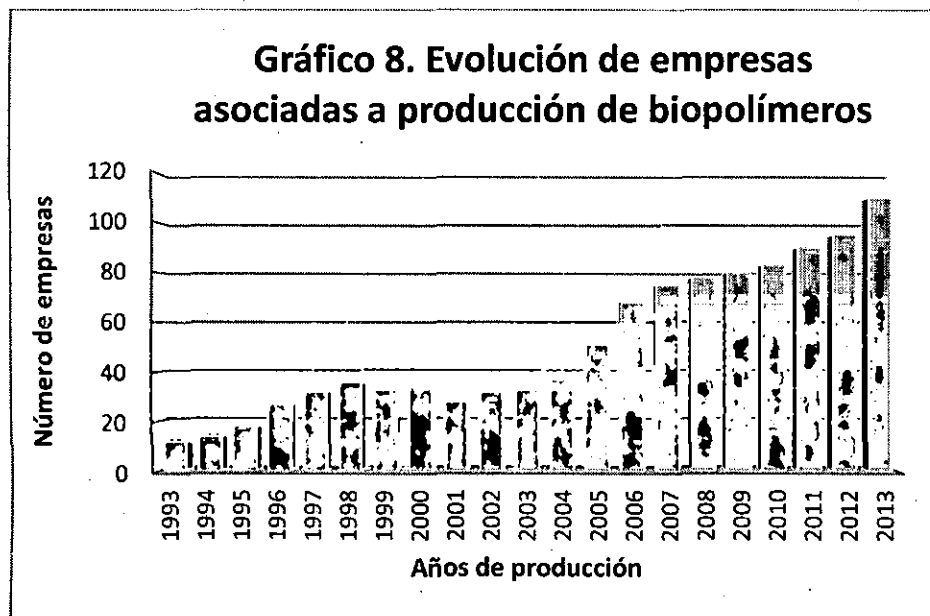
Fuente: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas



FUENTE: Elaborado por Odepa con información del Servicio Nacional de Aduanas

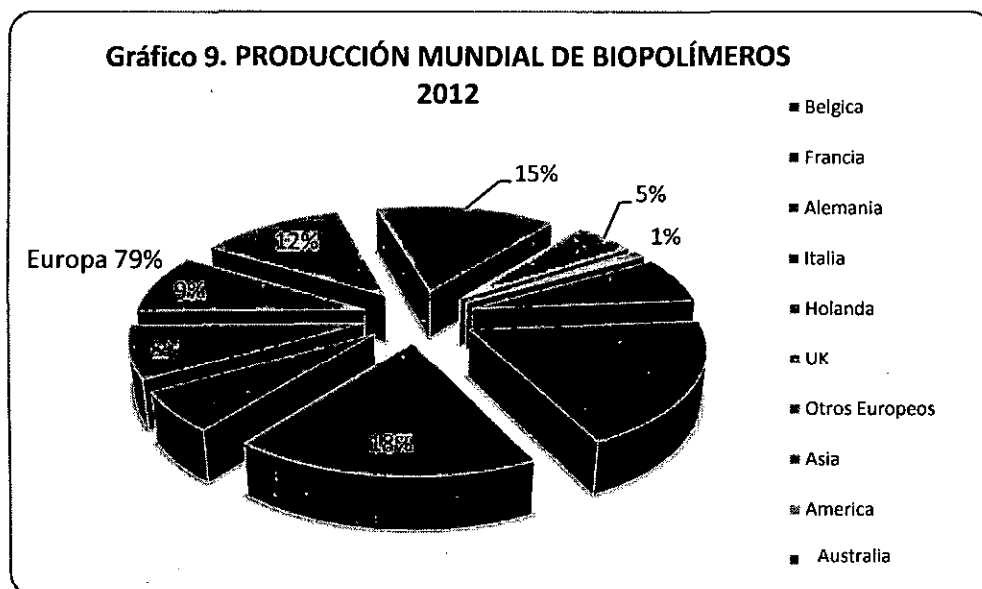
#### 2.2.4. Evolución del mercado de polímeros biodegradables (EDP)

Pueden ser fabricados a partir de recursos renovables, tanto de origen animal como vegetal, o recursos fósiles. Es la estructura química lo que hace a un polímero biodegradable, lo diferencia de un polímero convencional, y permite que pueda ser destruido por microorganismos, como hongos y bacterias en ambientes biológicamente activos. Aunque las cifras no son oficiales, se estima que el mercado actual de biopolímeros está alrededor de las 250000 toneladas al año, donde el consumo de Europa está alrededor de 50000 toneladas. De mantenerse el crecimiento continuo que se ha presentado hasta ahora, la capacidad global de producción de polímeros biodegradables alcanzaría la marca del millón de toneladas alrededor del año 2011. La evolución del número de empresas asociadas se ve representada en el siguiente Gráfico 8.



Elaboración propia

Se cita a continuación empresas dedicadas a la producción mundial de biopolímeros: BASF (Alemania), Biostarch (Singapur), Biotec (Alemania), Clarifoil (Reino Unido), Coopbox Europa (Italia), DuPont (Suiza), Faerch Plast (Dinamarca), Innovia Films (UK), Interpack (Alemania), Limagrain (Francia), NatureWorks (EE.UU), Novamont (Italia), Plantic Technologies (Australia), PolyOne (Bélgica), Purac Biochem (Holanda), Tianan Biologic Material Company (China), Unitika (Japón): (Ver Gráfico 9)



Fuente: U. Conrad, "Polymers from Plants to develop biodegradable plastics". Vol.10, No. 11

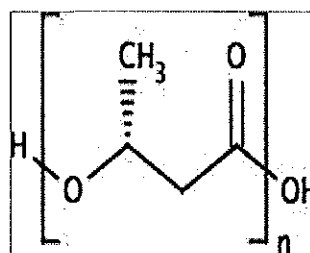
### 2.3. PRODUCTOS COMPETITIVOS

➤ **Los Polihidroxialcanoatos (PHA):** Son producidos generalmente por bacterias Gram negativas. Este BPL en la actualidad ya es sintetizado a partir de una sola fuente de carbono en bacterias recombinantes utilizando un medio de una mezcla de glicerol y caseína hidrolizada. Generalmente los PHA son insolubles en agua, biodegradables, no tóxicos, por lo cual uno de los principales beneficios que se obtienen de la aplicación de PHA es el ambiental. La utilización de estos productos, reduce la dependencia del petróleo por parte de la industria plástica, genera una disminución de los residuos sólidos en vertederos y reduce la emisión de gases que provocan el Efecto Invernadero. (Ver Figura 8)

#### Aplicaciones:

- ✓ Cubiertos, vasos, platos y filmes.
- ✓ Productos para la marina (USA).
- ✓ Bolsas de basura.
- ✓ Fibras.
- ✓ Adhesivos.
- ✓ Aplicaciones médicas.
- ✓ Tiene buena resistencia a la humedad y funciona como barrera aromática.

Figura 8. Estructura molecular del PHA



poli-(R)-3-hidroxibutirato (PHA)

➤ **Almidón termoplástico (TPS):**  $(C_6H_{10}O_5)_n$

El uso y desarrollo de polímeros biodegradables tales como el almidón termoplástico (TPS) ha abierto un gran campo de estudio e investigación, impulsado por la necesidad de encontrar alternativas viables a los polímeros convencionales derivados del petróleo.

Es importante saber que el almidón está compuesto por unidades repetitivas de glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) unidas por dos tipos de enlace glicosídicos:  $\alpha$ -(1-4) y  $\alpha$ -(1-6) y que adopta una disposición en hélice, dando una vuelta por cada 6 moléculas de glucosa, además, cada 12 glucosas, presenta ramificaciones por uniones (1 $\alpha$  - 6).

**Aplicaciones:**

- ✓ Bolsas.
- ✓ Film para envase.
- ✓ Chips loosefill.
- ✓ Productos para catering.
- ✓ Film agrícola.
- ✓ Se usa en la fabricación de televisores, impresoras, máquinas de afeitar.

➤ **Poliéster (PET) :**  $C_{10}H_8O_4$

El poliéster es una resina termoestable obtenida por polimerización del estireno y otros productos químicos. Las fibras de poliéster se obtienen por polimerización de monómeros a base de ácido tereftálico y glicol etilénico. Su aspecto es liso y brillante, es un mal conductor de la electricidad.

Otra propiedad característica de esta fibra es su propensión a formar pequeñas bolitas cuando se someten los tejidos al roce (pilling), lo que impide su empleo en tejido destinados a acabados con pelo (franela, duvetinas, etc.).

**Aplicaciones:**

- ✓ Film agrario.
- ✓ En la fabricación de indumentaria deportiva, salvavidas y cascos de ciclismo.
- ✓ Las resinas de poliéster (termoestables) son usadas también como matriz para la construcción de equipos, tuberías anticorrosivas y fabricación de pinturas.



## 2.4. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA FUTURA

Para la estimación de la demanda futura para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero, se ha determinado en base a la serie de datos históricos de consumo en función de las variables:

- Tasa de crecimiento consumo anual.
- Distribución y movilización de la población consumidora.
- Precio y disponibilidad de los bienes sustitutos.

El consumo del PLA no se concretiza en nuestro país, por la razón que el crecimiento de consumo anual se tomó como base las políticas arancelarias y producción mundial de nuestro producto, los datos arancelarios son del país de EEUU. El proyecto de la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) en el Perú es de importancia por el uso y aplicaciones ya mencionadas, por lo que el objetivo es que la producción logre que la demanda futura sea igual a la cantidad de importaciones. En el Perú no se importa el ácido poliláctico (PLA) pero la demanda de este biopolímero hará que ingrese al mercado, pero en vista que no se importa y ni se exporta este producto, la estimación de demanda será:

$$\text{Demanda} = \text{Producción}$$

En la Tabla 9 se observa el consumo total del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero en la producción mundial, base de datos arancelarios EE.UU.

**Tabla 9. Consumo - Producción mundial del ácido poliláctico (PLA) en TM**

AÑO	CONSUMO (Kg)	CONSUMO <sup>TM</sup>
2002	29040000	29040
2003	34848000	34848
2004	48787000	48787
2005	58544000	58544
2006	70252000	70252
2007	77277000	77277
2008	85004000	85004
2009	90000000	90000
2010	100000000	100000
2011	112000000	112000
2012	120000000	120000

Elaboración propia

Se muestra en la Tabla 10 el consumo cronológico del ácido poliláctico (PLA) desde el año 2002 hasta el año 2012. La estimación de demanda futura se calcula por tres métodos:

- A) Como promedio de los % anuales en intervalo de tiempo.  
 B) Como razón del aumento promedio con el consumo promedio.  
 C) Por el método de linealización de los mínimos cuadrados.

**Tabla 10. Variación de consumo del biopolímero ácido poliláctico (PLA)**

n	AÑO	CONSUMO (kg)	CONSUMO (TM)	AUMENTO (TM)	%AUMENTO ANUAL
1	2002	29040000	29040	0	0
2	2003	34848000	34848	5808	20.0
3	2004	48787000	48787	13939	40.0
4	2005	58544000	58544	9757	20.0
5	2006	70252000	70252	11708	20.0
6	2007	77277000	77277	7025	10.0
7	2008	85004000	85004	7727	10.0
8	2009	90000000	90000	4996	5.9
9	2010	100000000	100000	10000	11.1
10	2011	112000000	112000	12000	12.0
11	2012	120000000	120000	8000	7.1
TOTAL		825752000	825752	90960	156.1

Elaboración propia

- A) Como promedio de los % anuales en intervalo de tiempo:

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{\sum \%i}{n-1} = \frac{156.1}{11-1} = 15.6\%$$

$$\text{Consumo Promedio} = \frac{\sum \text{consumo}}{n} = \frac{825752}{11} = 75068.4 \text{ TM}$$

$$\text{Aumento Promedio} = \frac{\sum \text{aumento}}{n-1} = \frac{90960}{10} = 9096 \text{ TM}$$

$$\begin{aligned} \text{Tasa de Crecimiento de aumento promedio} &= \frac{\text{Aumento Promedio}}{\text{Consumo Promedio}} \times 100 \\ &= \frac{90960}{75068.4} \times 100 = 12.1 \% \end{aligned}$$

- B) Como razón del aumento promedio con el consumo promedio:

$$D_n = D_0 (1+x)^y$$

$$D_{2020} = 29040(1+0.121)^{22}$$

$$D_{2020} = 358360 \text{ TMPA}$$

- C) Por el método de linealización de los mínimos cuadrados:

Con la tasa de crecimiento obtenida de los datos se puede decir que el crecimiento del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero aumentó en 12.1% anualmente. Se utilizará para su estimación de la demanda futura, el método de mínimos cuadrados como muestra la Tabla 11.

**Tabla 11. Estimación de demanda futura por método de mínimos cuadrados**

n	AÑO	CONSUMO <sup>TM</sup> (Y)	(X)	X*Y	X <sup>2</sup>
1	2002	29040	0	0	0
2	2003	34848	1	34848	1
3	2004	48787	2	97574	4
4	2005	58544	3	175632	9
5	2006	70252	4	281008	16
6	2007	77277	5	386385	25
7	2008	85004	6	510024	36
8	2009	90000	7	630000	49
9	2010	100000	8	800000	64
10	2011	112000	9	1008000	81
11	2012	120000	10	1200000	100
TOTAL		825752	55	5123471	385

**\*Fuente: Arancelaria de Producción Mundial 2012**

**Fórmulas:**

$$\Sigma y = na + b\Sigma x$$

$$825752 = 11a + 55b \dots (1)$$

$$\Sigma xy = a\Sigma x + b\Sigma x^2$$

$$5123471 = 55a + 385b \dots (2)$$

Resolviendo la ecuación 1 y 2 se obtiene:

$$a = 29854.2$$

$$b = 9042.8$$

Por lo tanto el consumo del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero se ajustó a la ecuación del modelo de regresión:

$$y = 29854.2 + 9042.8x$$

La estimación de demanda futura del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero en el año:

$$y_{2022} = 29854.2 + 9042.8*(20)$$

$$y_{2022} = 210710.2 \text{ TMPA}$$

La solución de este modelo se representa en la Tabla 12 con una demanda futura hasta el año 2022.

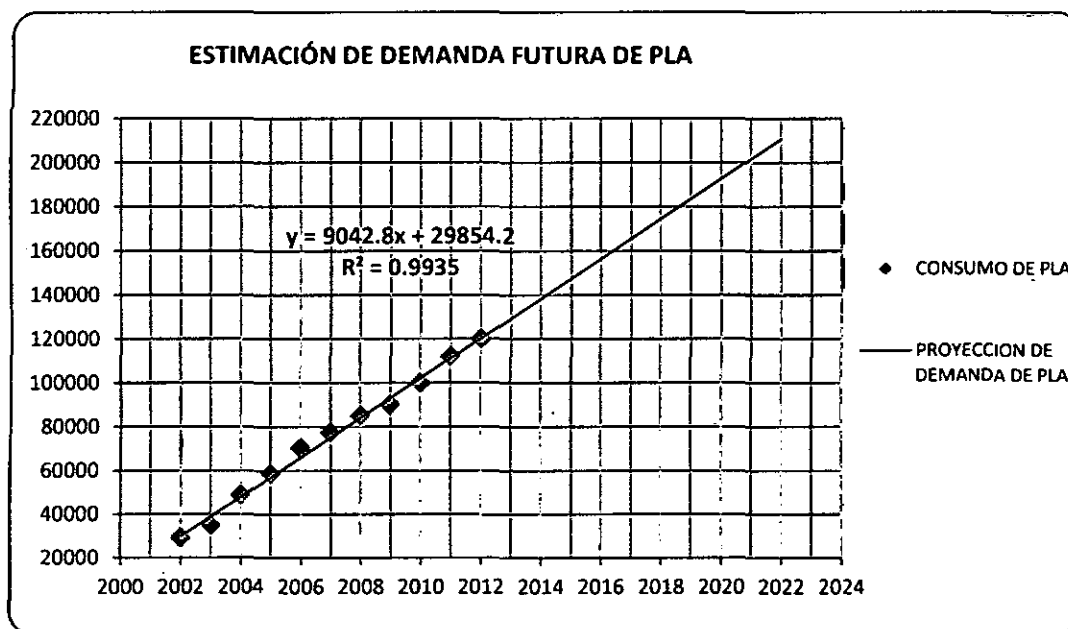
Tabla 12. Proyección de Demanda Futura del ácido poliláctico (PLA) hasta 2022

Años	X	Consumo (TM)
2013	11	129325.0
2014	12	138367.8
2015	13	147410.6
2016	14	156453.4
2017	15	165496.2
2018	16	174539.0
2019	17	183581.8
2020	18	192624.6
2021	19	201667.4
2022	20	210710.2

Elaboración propia Fuente: Arancelaria de Producción Mundial 2012

Así también se representa en la Gráfica 10 la demanda futura del ácido poliláctico (PLA) hasta el año 2022.

Gráfico 10. Proyección de Demanda Futura del ácido poliláctico (PLA)



Elaboración propia

El consumo promedio es de 75068.4 TM al año, lo que tomaremos como demanda total del producto, para evaluar nuestro proyecto. La demanda del ácido poliláctico (PLA) en el año 2022 será de 210710.2 TMPA.

Los registros de aduanas, nos marca claramente que no hay producción nacional, ni de importación y exportación por lo que se ha tomado los datos de producción mundial para llevar a cabo este proyecto en el mercado nacional para oferta a los consumidores.

## **2.5. ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PLANTA**

Siendo el ácido poliláctico (PLA) un biopolímero de alta calidad y de mucha importancia; nuestra capacidad de planta se tomara en cuenta los productos competitivos, a tomar en cuenta son: Almidón termoplástico (TPS), los Polihidroxialcanoatos (PHA) y Poliéster (PET). Por la razón que nuestra capacidad de planta se encuentra en el rango de estos productos porque son los que competirán en el mercado, saldrá favorecido el que tenga mayor calidad y tenga producción aceptable para el consumidor dependiendo sobre todo de la demanda. Se estima también por los índices económicos que fluctúan en el mercado mundial y el consumo per cápita que permitirá visualizar que tal demanda tiene nuestro producto o cuanto los consumen mundialmente.

La capacidad de planta del ácido poliláctico (PLA) en el año 2012 fue de 140000 TMPA este dato basado en el mercado mundial, en ese año el consumo es de 120000 TMPA según nos muestra la Tabla 11.

Debido que esta capacidad de planta es a escala industrial, nuestro proyecto elaborado está enfocado a la demanda futura hasta el año 2022, con una cantidad de **210710.2 TMPA** siendo la capacidad de planta proyectada para la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

$$\text{DEMANDA ESTIMADA} = \text{CAPACIDAD DE PLANTA}$$

## **2.6. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO PER CÁPITA**

La tesis tendrá la finalidad que el producto ácido poliláctico (PLA) se invierta en nuestro país y se encuentre en el mercado nacional, con proyección a futuro que se exporte, para el consumo per cápita se toma en cuenta lo siguiente. La cantidad de habitantes en el Perú es 29207000, base de datos de índice demográfico (INEI). El consumo promedio fue de 75068.4 TM.

El consumo per cápita se halla relacionando el número de habitantes en el Perú es de 29207000 entre el consumo promedio que es de 75068.4 TM, es decir:

$$\text{Consumo per cápita} = 75068400 \text{ Kg} / \text{año} / 29207000 \text{ hab}$$

$$\text{Consumo per cápita} = 2.57 \text{ Kg/año /hab.}$$

## 2.7. ESTIMACION DEL PRECIO DE VENTA

La estimación del precio de venta para el ácido poliláctico (PLA) determinado por el mercado mundial está en el rango de **\$3.271/kg** y **\$7.197/kg**. Los productos competitivos del ácido poliláctico (PLA) tendrán un precio de venta fijado por el mercado:

- Para los Polihidroxialcanoatos (PHA) su precio de venta es de **\$6.790/kg**.
- El Almidón Termoplástico (TPS) su Pv es de **\$4.750/kg**.
- Los Poliésteres su Pv es de **\$5.772/kg**

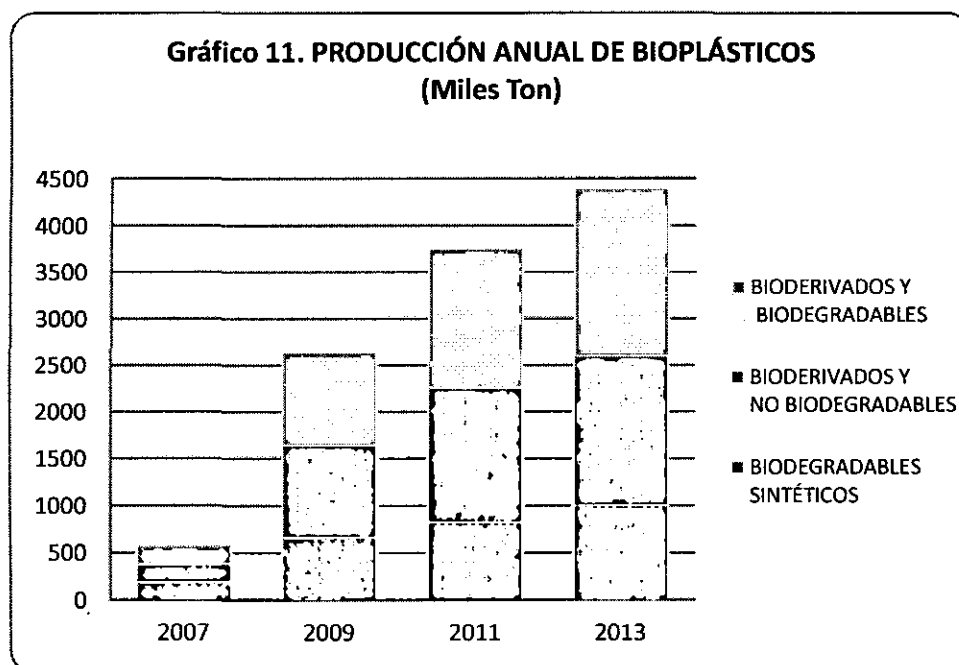
Para fijar el precio de venta del ácido poliláctico (PLA) tomaremos en cuenta lo siguiente:

- ✓ El precio es un elemento esencial del proceso de marketing.
- ✓ El precio no tiene que ser excesivamente alto porque puede propiciar la aparición de competidores. Por el contrario, un precio muy bajo puede dañar la imagen del producto porque el consumidor pensará que se le vende mala calidad.
- ✓ El análisis de la empresa debe considerar fundamentalmente cuatro aspectos sobre el precio:
  - El precio en relación a los competidores.
  - La distribución de las ventas según el precio en relación a los competidores.
  - La elasticidad del precio para el producto estudiado; es decir, si ante un aumento del precio las ventas disminuyen; o si por el contrario, las ventas se mantienen básicamente constantes ante una variación del precio.
  - La estructura de costos del producto y su calidad es de importancia.
- ✓ Un estudio de los precios y consumos en años anteriores permite estimar la demanda, siendo la información básica para tomar decisiones sobre precios.
- ✓ La empresa tiene que decidir dónde quiere posicionar su oferta de mercado.

En conclusión el Pv promedio del ácido poliláctico (PLA) en el mercado será de **\$5.234/kg** comparando los usos de este biopolímero cuyo valor agregado es alto y la importancia de estar apto para competir en el mercado.

## 2.8. PROYECCIONES A FUTURO DEL BIOPOLÍMERO (PLA) EN EL PERÚ

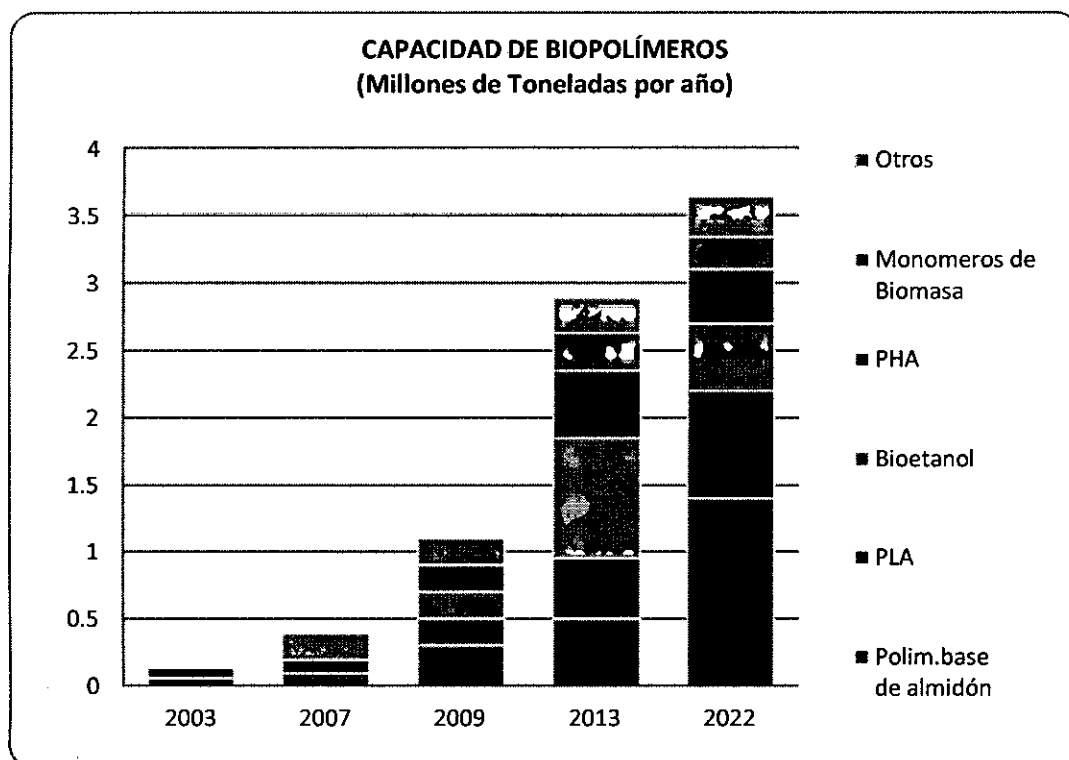
La Asociación Europea de Bioplásticos (European Bioplastic) estima que existe un potencial de crecimiento para llegar al 10% en el mercado europeo (4 millones de TM/año), partiendo que actualmente cerca del 12% consumo total del plástico estándar es reemplazado por bioplásticos lo que para el año 2008 representó una producción de aproximadamente 600000 TM. El crecimiento de la producción de bioplásticos en los últimos 5 años en el Perú, es sin duda una respuesta a las necesidades de mercado y al alto precio del petróleo y su futuro agotamiento. Por este motivo, existe una tendencia legislativa a limitar el consumo de ciertos productos plásticos, como supuesta solución a un problema generado por el mal uso de estos materiales. En un entorno como este, el crecimiento del mercado de los bioplásticos apunta una tendencia creciente de forma exponencial con unas previsiones de aumento del 75% de la producción para el año 2013. Actualmente no existen empresas peruanas fabricantes del biopolímero ácido poliláctico (PLA) por lo que el 90% del mercado mundial se encuentra dominado por empresas como Novamont, NatureWorks, BASF y Rodengurg Biopolymers. Una buena parte de las aplicaciones son en el sector agrícola y envase y embalaje (bolsas de basura, tipo camiseta, redes de embalaje de artículos hortofrutícolas), en aplicaciones emergentes en el sector textil en aplicaciones médicas. (Ver Gráfico 11)



Elaboración propia Fuente basada en: <http://www.european-bioplastics.org>

Sin embargo, en base a los anuncios recientes de determinadas compañías fabricantes de biopolímeros sobre las nuevas proyecciones de crecimiento en su capacidad de producción, se acerca a 2.3 millones de Toneladas en el año 2013 a nivel mundial. No obstante, estas positivas previsiones de crecimiento, pueden verse ralentizadas por el efecto de la crisis económica. En el Gráfico 12 que se muestra a continuación se destacan los biopolímeros más importantes en producción a nivel del mercado global.

**Gráfico 12. Previsiones de crecimiento del mercado de los biopolímeros**



Elaboración propia Fuente basada: <http://www.european-bioplastics.org>



## **CAPÍTULO III**

### **UBICACIÓN DE LA PLANTA**

La ubicación correcta de la planta química del biopolímero ácido poliláctico (PLA) es importante para su buen éxito como la selección de un buen proceso. Este capítulo tiene como objetivo, describir los factores de mayor importancia que permiten seleccionar el área geográfica, con el fin de localizarla en la posición económicamente más favorable, de lo contrario pueden perderse las ventajas competitivas del proceso. Se realiza un análisis cuidadoso de todos los factores que deben considerarse en la selección del lugar óptimo; para asegurar la operatividad de la Planta, se considera el territorio del país dividido en tres zonas: Norte, Centro y Sur.

Para la ubicación de la Planta se ha aplicado el método de los Factores de Balanceo, evaluando la incidencia de cada uno de ellos.

#### **3.1. FACTORES MÁS IMPORTANTES Y LUGARES MÁS FACTIBLES**

Los costos de la materia prima y del transporte son de importancia, que obligan a instalar una Planta cerca de la fuente de abastecimiento; lo que reduce el número de sitios posibles para la ubicación. Los factores que afectan la ubicación de la Planta se constituyen en factores primarios y factores secundarios, estos son: materia prima (lactosuero), mercado, combustible y energía, transporte, agua industrial, disposición de efluentes, mano de obra, clima y leyes reguladoras. Los lugares factibles para la ubicación de la planta química del biopolímero ácido poliláctico (PLA); dependerán del factor más importante que es la materia prima obtenido a partir del lactosuero, subproducto en la fabricación del queso proveniente de la coagulación. La razón en la que se ubicará la planta química será en una de las tres cuencas productoras de leche fresca en el Perú; destinadas a la producción del queso, estas son: Arequipa, Lima y Cajamarca produciéndose en ellas el 70% de la producción nacional de leche fresca, destinada principalmente a la industria.

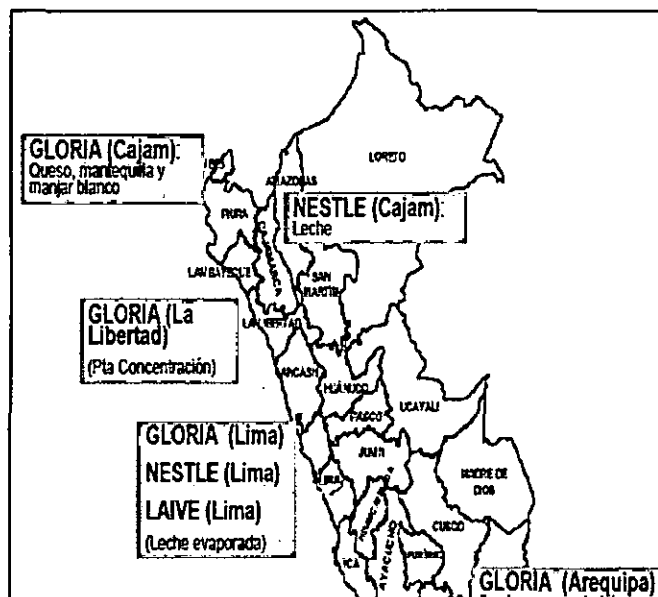
#### **3.2. SUMINISTRO DE MATERIA PRIMA: LACTOSUERO**

La elección de la materia prima, es un factor fundamental para la ubicación final de la planta química. Se debe hacer un intento para estimar la duración de la fuente del lactosuero en función de la demanda futura, deben localizarse y evaluarse otras fuentes en el área que pudieran sustituir la estudiada, o servir de alternativa.

Puede determinarse el costo del lactosuero entregada en el sitio de la planta todas aquellas fuentes que reúnan las especificaciones de calidad y cantidad que requiere el proceso. La materia prima es el lactosuero producto de la coagulación de la leche en el cuajado para la obtención del biopolímero ácido poliláctico (PLA) que debe ser de alta calidad; cuya fuente proveniente de la producción de queso, pero la base es la leche fresca proveniente de la industria láctea de las unidades agropecuarias. (Ver Figura 9)

La producción de leche en el Perú tiene tres destinos específicos: leche consumo (se utiliza para autoconsumo y terneraje), leche cruda (venta directa al porongueo) y leche para procesamiento artesanal e industrial. Son tres las principales cuencas lecheras, las mismas que se desarrollan en torno a los departamentos de **Cajamarca (25.7%)**, **Lima (19.4%)** y **Arequipa (24.7%)** produciéndose en ellas el 70% de la producción nacional de leche fresca. En el Perú la producción actual de leche es de 4600 TM/día, el 54% es procesada por la industria láctea, y el 46% restante se destina al procesamiento de productos artesanales. Se procesan 4479 L/día de leche, se sabe que por lo general el 90% de la leche procesada en la industria quesera es lactosuero, por lo tanto la producción es de 4031 L/día de lactosuero.

**Figura 9. Localización de suministro del lactosuero en el Perú**



Fuente: DGIA-MINAG

### **3.3. ACCESIBILIDAD DE LOS MERCADOS**

Hoy se tiende a situar la Planta cerca de los mercados consumidores de los productos; la razón de ello es que bajo la presión de la competencia, el servicio al cliente es factor primordial en la venta de productos químicos y de artículos elaborados. En Perú, la industria del plástico se ha incrementado su actividad manufacturera en las últimas tres décadas, con un crecimiento promedio anual del 8%.

Dicha tendencia de consumo ha provocado que la industria mundial se incline por desarrollar diversos tipos de plásticos biodegradables; esto con el objetivo de obtener la descomposición de los polímeros en un menor tiempo, y de esta manera reducir los niveles de contaminación en el medio ambiente.

En el Perú existen 3 empresas lácteas, líderes en el acopio y transformación, así tenemos a: Cajamarca se localiza una planta de procesamiento de leche evaporada de Nestlé, así como la planta de quesos y mantequilla de Gloria, además en Cajamarca encontramos plantas de transformación de productores artesanales formales que acopian un 5% de la producción de leche y procesadores informales que acopian el 15% de la producción de leche. En Lima encontramos a Laive y a Gloria nuevamente, que se disputan el mercado de leche. Mientras que en Arequipa se encuentra una planta de procesamiento de leche en tarros de leche evaporada; así como de queso y mantequilla, Gloria representa 70% del mercado del Sur y en esta zona también se trabaja la producción de algunos de los productos de Laive.

La accesibilidad al mercado nacional se registra principalmente en la costa peruana del Perú y en la ciudad de Lima; ya que concentran las principales industrias de plástico y por lo tanto el mayor consumidor de este producto, factible para la venta del biopolímero ácido poliláctico (PLA). La accesibilidad para el mercado extranjero, se rige por los canales de comercialización, el país cuenta con buena disponibilidad para el intercambio de mercadería a nivel internacional.

### **3.4. SUMINISTRO DE ENERGÍA**

La planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) requiere de vapor y energía eléctrica para su operación. La energía se compra a las compañías de servicios públicos, locales o se genera la energía; deben hacerse arreglos con los servicios locales para obtener energía auxiliar en casos de emergencia.

Debe conocerse en forma detallada la cantidad de energía y vapor requerido para la operación de la planta proyectada antes de proseguir el estudio, analizando cuidadosamente el costo de todos los combustibles disponibles en la zona.

Se cuenta con energía de la central hidroeléctrica Carhuaquero ubicada en Cajamarca; aprovecha las aguas del río Chancay, tiene una caída neta de 475 m para generar 75 Megavatios (Mw) pertenece a la empresa Egenor S.A. También continúa el avance en la construcción de las líneas de transmisión de energía en Chilca – Marcona - Montalvo de 500 Kv, la línea longitudinal de la sierra entre Paragsha - Cajamarca, de 220 Kv y la línea Independencia – Ica.

La energía eléctrica utilizada será de 614 millones de kilovatios-hora, lo que equivale al 5,7% del consumo total de la actividad manufacturera.

### **3.5. SUMINISTRO DE AGUA**

Este factor tiene importante papel al determinar la ubicación de la planta química. Si el proceso requiere agua abundante, la Planta se sitúa en lugares en que sea posible abrir pozos o alumbrar mantos de agua. Entre los factores que han de ser examinados se cuentan la pureza del agua, las cantidades que se necesitan y la regularidad del suministro. Por la irregularidad de las lluvias en muchas localidades es necesaria la construcción de diques agua arriba. Con frecuencia, los operadores químicos tienen que recurrir a medios artificiales, como la destilación y el intercambio de iones, para purificar y conservar el agua. Esto aumenta los gastos de funcionamiento y el costo de la planta química.

SN Power Perú se ha comprometido a construir la hidroeléctrica de Cheves de 168.2 Mw y vender 109 Mw de potencia, su energía asociada a empresas distribuidoras a un precio de 47.5 dólares por Mw hora, el máximo permitido bajo los términos de la licitación. SN Power opera 271 Mw en centrales ubicadas en Lima, Ancash, Cajamarca, Junín y Arequipa, suministrando toda el agua y la energía generada al sistema nacional.

Las principales cuencas hidrográficas son Marañón; conformada por los ríos Chinchipe, Chamaya, Llacano, Lunyhuy, Llanguat, Crisnejas, principalmente; y la cuenca del Pacífico, conformada por los ríos Sangarará, Chancay, Saña, Chilete-Tembladera, Chicama y otros.

### **3.6. TRANSPORTE**

El precio del transporte influye de manera decisiva en el precio unitario del producto. La existencia de las facilidades en el transporte reduce los tiempos de duración: entrada y salida, tanto de materia prima, reactivos y como del producto.

La red vial de Cajamarca, actualmente tiene una longitud total de 5928.55 kilómetros, de los cuales 363.46 kilómetros (6,13%) es asfaltada, 1728.97 kilómetros (29.16%) es afirmada, 917.53 kilómetros (15.47%) sin afirmar.

Cajamarca cuenta con cerca del 7% de la red vial, se encuentra a 872 km al norte de Lima Metropolitana. En Arequipa existen vías interregionales, constituidas por la variante de Uchumayo que sirve de conexión con las ciudades de la Costa. La ciudad de Lima se encuentra la carretera Panamericana con carreteras pavimentadas.

En el transporte aéreo la ciudad de Cajamarca cuenta con el aeropuerto Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias, el cual se encuentra a 3 kilómetros del centro histórico, sus pistas están totalmente pavimentadas. La ciudad de Arequipa es servida por el aeropuerto internacional Alfredo Rodríguez Ballón ubicado en el distrito de Cerro Colorado. En la ciudad de Lima cuenta con el aeropuerto Jorge Basadre totalmente remodelado y en buen estado. El transporte de barco probablemente será el medio de transporte más barato, de manera especial para acarreos de grandes volúmenes a grandes distancias. Es una ventaja para la Planta de proceso colindar con aguas navegables, aunque las operaciones iniciales no requieren de embarques por agua.

### **3.7. DISPOSICIÓN DE MANO DE OBRA**

La instalación de esta nueva planta química del biopolímero ácido poliláctico (PLA) demandará de una gran cantidad de mano de obra calificada y semicalificada; porque requiere de la construcción de la misma, así como posteriormente un número de operarios, ingenieros industriales, ingenieros químicos, técnicos, entre otros profesionales que requiera la Planta.

En la etapa de construcción de la planta química se estimaría muchos puestos de trabajo, así como también en la etapa operativa, se requerirá la contratación de provisión de servicios como: talleres de mecánica, construcción de viviendas, hospedajes, transporte del personal, alimentación, comunicación, entre otras. Se estudiará la disponibilidad y la destreza del mercado laboral para la localización de la Planta.

Son importantes la tarifas de los salarios de acuerdo a Ley, que existen en la comunidad de la zona establecida, pero sería un error planear la tarifas más bajas. Una fuerza laboral estable es valiosa para el éxito de la operación de esta nueva Planta.

### **3.8. LEYES REGULADORAS**

La Ley Orgánica 12/1995, del 12 de diciembre, y la Ley Orgánica 3/1992, del 30 de abril, prevén que el Gobierno aprobará las relaciones de material de defensa, de doble uso y establecerá los requisitos, condiciones y procedimientos a que se sujetarán las autorizaciones de exportación. Mediante estas leyes se incentiva que la industria química del biopolímero ácido poliláctico (PLA) y otras industrias se ubiquen lejos de la capital, para generar riquezas en otras regiones del Perú.

Además las leyes laborales que se aplican en el Perú, han aprobado leyes que afectan las relaciones laborales, compensaciones a los trabajadores, edad mínima y otras disposiciones relacionadas con cuestiones laborales; por ejemplo que la Planta cuente con parques industriales para que sea competitiva.

El precio que se toma como referencia es el precio FOB de la leche fresca. No obstante, las importaciones de lácteos provenientes de los países de la región andina tienen un arancel de 0%, al igual que nuestras exportaciones a dichos países.

### **3.9. CLIMA**

La altura de la región Cajamarca oscila entre los 400 m.s.n.m., (Distrito de Choros - Provincia de Cutervo) y los 3550 m.s.n.m., (Distrito Chaván - Provincia de Chota). El relieve cajamarquino es muy accidentado debido a que su territorio es atravesado de Sur a Norte por la Cordillera occidental de los andes. En la región Arequipa hay variedad de climas tropicales de montaña: templado cálido en los fondos de valle del piso inferior andino; templado en las altitudes medias; templado frío pero con abundancia lluvias.

La región andina consta de paisaje accidentado pero se encuentra valles y ríos en abundancia. Pero la zona deberá estar fuera de peligro de los huaycos o derrumbes.

El clima de Lima resulta especialmente particular dada su situación; combina una práctica ausencia de precipitaciones, con un altísimo nivel de humedad atmosférica y persistente cobertura nubosa. Así, sorprende por sus extrañas características a pesar de estar ubicada en una zona tropical a 12 grados latitud sur y casi al nivel del mar.

### **3.10. DISPOSICIÓN DE EFLUENTES Y/O SUBPRODUCTOS**

La gestión de efluentes puede involucrar a sustancias sólidas, líquidas o gaseosas con diferentes métodos para el respectivo proceso químico. Se recalca que la mayoría de plantas químicas generan residuos o subproductos peligrosos que no podrán extraerse de la planta, si antes no haberlo tratado para mitigar su efecto nocivo.

La disposición de efluentes es un factor de importancia para la ubicación de la planta química en la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA); puesto que presenta peligro eminente para la contaminación a los factores abióticos: suelo, aire y agua.

### 3.11. EVALUACIÓN POR EL MÉTODO FACTORES DE BALANCEO

**Producto:** Acido Poliláctico (PLA).

**Materia prima:** Lactosuero.

**Alternativas de localización:** Lima, Cajamarca, Arequipa.

**Tabla 13. Factores de Balanceo para ubicación de planta de ácido poliláctico (PLA)**

	VALOR DEL FACTOR	PONDERACIÓN			TOTALES		
		LIMA	CAJAMARCA	AREQUIPA	LIMA	CAJAMARCA	AREQUIPA
Suministro de materia prima	20	16	20	19	320	400	380
Suministro de energía y combustible							
❖ Energía eléctrica	18	18	18	17	324	324	288
❖ Combustible	17	17	16	17	289	272	289
Suministro de agua							
❖ Calidad	16	14	15	15	224	240	240
❖ Cantidad	15	14	13	14	210	195	210
Clima							
❖ Condiciones de corrosión	14	12	13	12	168	182	168
❖ Condiciones de trabajo	13	12	12	12	156	156	156
Accesibilidad al mercado	12	12	11	10	144	132	120
Mano de obra							
❖ Cantidad	11	11	10	10	121	110	110
❖ Calidad	10	10	9	9	110	90	90
❖ Costo	9	8	8	8	72	72	72
Transporte	8	7	6	6	56	48	48
Leyes reguladoras	7	6	7	6	42	49	42
Disposición de efluentes	5	3	4	3	15	20	15
<b>TOTAL</b>					<b>2251</b>	<b>2290</b>	<b>2228</b>

Elaboración propia

Según el método de los factores de balanceo el lugar donde será mejor la ubicación de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero es en la ciudad de **Cajamarca** la zona Norte- Sierra del Perú.

# CAPÍTULO IV

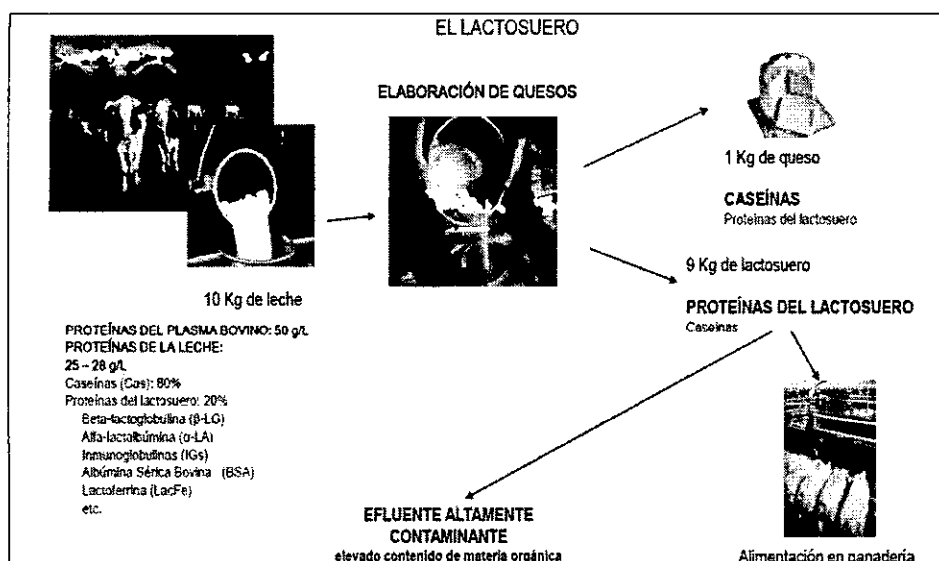
## MATERIA PRIMA

### 4.1. MATERIA PRIMA: LACTOSUERO

El lactosuero es el líquido claro de color verdoso amarillento, sabor fresco, con carácter ácido obtenido en el proceso de fabricación del queso después de la separación de la cuajada o fase micelar, representa el 90% peso de la leche utilizada para la elaboración del queso. El costo del lactosuero es un juicio de valor. Algunas personas piensan que su costo debe ser muy cercano a cero, puesto que la fabricación del queso tradicionalmente absorbe el 100% del costo de la leche y los demás ingredientes. Sin embargo, aquí se ha adoptado el criterio de que el lactosuero tiene valor monetario distinto de cero, tanto por el valor intrínseco de sus componentes, por la funcionalidad del lactosuero y sus derivados.

El suero de leche (lactosuero) es uno de los residuos más representativos de la industria lechera y uno de los contaminantes más severos que existen a nivel ambiental, cuyos componentes principales como la lactosa, calcio, sales minerales y proteínas lactoséricas de bajo peso molecular solubles en su punto isoeléctrico son retenidas en un 55%, ya que no reaccionan con el cuajo. Presenta una cantidad rica de minerales donde sobresale el potasio, calcio, fósforo, sodio y magnesio. Cuenta también con vitaminas del grupo B (tiamina, ácido pantoténico, riboflavina, piridoxina, cobalamina) y ácido ascórbico. (Ver Figura 10)

**Figura 10. El lactosuero**



Fuente: Alais, C. 2010. Ciencia del lactosuero



## 4.2. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

Las pruebas de análisis fisicoquímicos empleadas en el lactosuero para la obtención del biopolímero de PLA se basaron en los principios y métodos que se utilizan en la evaluación de la leche y productos lácteos. (Ver Figuras 11 y 12)

### ➤ **Determinación de acidez :**

❖ **Principio del método:** Se basa en la neutralización de la acidez de la muestra, mediante titulación con una solución normalizada de hidróxido de sodio, usando fenolftaleína como indicador. Se realiza por la NTP 202.116 2008

(Ver figura 11)

❖ **Expresión de resultados:** Se reporta la acidez en gramos de Ácido Láctico/100 g de leche:

$$A = \frac{V \cdot N \cdot 0.090 \cdot 100}{W}$$

Donde:

V= volumen en ml de solución 0.1 N de Hidróxido de Sodio gastado

N= normalidad de la solución de NaOH.

W= peso de la muestra en gramos.

0.009 = factor de ácido láctico en mili equivalentes.

100= expresión %

### ➤ **Determinación de cenizas :**

❖ **Principio del método:** Se basa en la incineración de una parte exactamente pesada de la muestra para determinar su contenido mineral. Se realiza por el MÉTODO OFICIAL AOAC 945.46. Cap.33, Pág. 10, Vol. II, 16<sup>th</sup> Ed. 1995.

❖ **Expresión de resultados:**

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 100}{PM}$$

Donde:

P<sub>1</sub>= peso de la cápsula.

P<sub>2</sub>= peso de la cápsula mas ceniza.

PM = peso de la muestra

### ➤ **Determinación de grasas :**

❖ **Principio del método:** La muestra debe someterse a hidrólisis alcalina antes de la extracción con éter. Luego el éter se evapora y el residuo se seca y pesa.

❖ **Expresión de resultados:**

$$\% \text{ Grasas} = \frac{M_1 - M_2}{W} \cdot 100$$

Donde:

$M_1$  = peso del recipiente con grasa

$M_2$  = peso del recipiente secado y vacío.

$W$  = peso de la muestra.

➤ **Determinación de proteínas:** (Ver Figura 13)

❖ **Principio del método:** Se basa en la digestión de la muestra en  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico), utilizando  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  como catalizador  $K_2SO_4$  (sulfato de potasio) como elevador del punto de ebullición, para liberar el nitrógeno de la proteína y retener el nitrógeno como sal de amonio. Se añade NaOH concentrado para liberar el  $NH_3$ , el cual es destilado y recolectado en solución de  $H_2BO_3$  (ácido bórico) y titulado. Se realiza por la Norma Técnica Peruana 202.119:1998 (Revisada el 2014).

❖ **Expresión de resultados:**

$$\% \text{ Nitrógeno} = [1.4007 \cdot (V_s - V_b) \cdot N / W]$$

Donde:

$V_s - V_b$  = ml de titulante HCl utilizado para la muestra y el blanco, respectivamente.

$N$  = Normalidad de solución de HCl.

$W$  = Peso de la muestra en gramos.

**NOTA:** Multiplicar el porcentaje de nitrógeno por el factor 6.38 para calcular el porcentaje de proteína.

$$\% \text{ Proteína} = \% \text{ Nitrógeno} \times 6.38$$

➤ **Determinación de sólidos totales:**

❖ **Principio del método:** Se basa en la evaporación del agua presente en una parte exactamente pesada de la muestra, para determinar su contenido de sólidos. Se realiza por la NTP 202.118:1998 (Revisada el 2014)

❖ **Expresión de resultados:**

$$\% \text{ Sólidos totales} = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 100}{W}$$

Donde:

$P_1$  = peso de la cápsula.

$P_2$  = peso de la cápsula más sólidos.

$W$  = peso de la muestra.

➤ **DBO<sub>5</sub>:**

❖ **Principio del método:** El método consiste en llenar con la muestra, hasta rebosar, una botella para DBO con sello de agua de un tamaño específico, que se incube a la temperatura especificada durante 5 días. Se calcula la DBO por diferencia entre el oxígeno disuelto (OD) inicial y final. Se realiza por el Método APHA 5210-B, vol. III, 20<sup>th</sup>. Ed. 1999.

❖ **Cálculos:**

$$DBO_5 = \frac{(D_1 - D_2) - ((B_1 - B_2) * (1 - 0.01 * P))}{0.01 * P}$$

Donde:

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno en mg/l de O<sub>2</sub>

D<sub>1</sub>: OD inicial de la muestra diluida después de la preparación, mg/l.

D<sub>2</sub>: OD final de la muestra diluida después de 5 días de incubación, en mg/l.

B<sub>1</sub>: OD inicial del blanco de agua de dilución después de la preparación, mg/l.

B<sub>2</sub>: OD final del blanco de dilución después de 5 días de incubación, mg/l.

P: Dilución de la muestra en %. (1%, 2%, 3%...)

➤ **DQO:**

❖ **Principio del Método:** La mayoría de los tipos de materia orgánica se oxida por una mezcla de ebullición de los ácido crómico y sulfúrico. Una muestra se somete a reflujo en una solución fuertemente ácida con un exceso conocido de (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>). Después de la digestión, el resto de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> no reducido se titula con sulfato ferroso amónico para determinar la cantidad de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> consumida y la materia oxidable se calcula en términos de equivalente de Oxígeno. Se realiza por el Método APHA 5220-B, vol. III, 20<sup>th</sup>. Ed. 1999.

❖ **Cálculos:**

$$\text{mg/L COD} = \left( \frac{(a-b) * c * 8000}{\text{ml muestra}} \right) - d$$

Donde:

COD: Demanda Química de Oxígeno

a: ml Fe (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> usado en el blanco

b: ml Fe (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> usado en la muestra

c: Normalidad de Fe (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>

d: Cl correctivo: mg/l Cl \* 0.23

➤ **Oxígeno disuelto:**

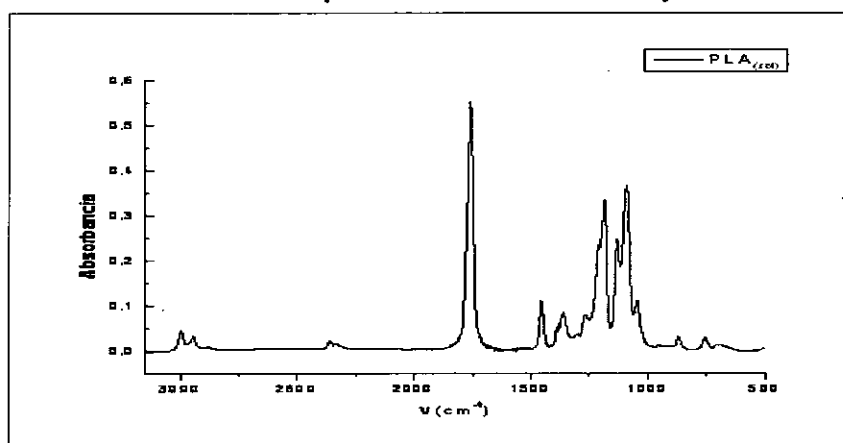
❖ **Principio del Método:** Según el Método APHA 4500-O-C, vol. III, 20<sup>th</sup>. Ed. 1999.

❖ **Cálculos:**

$$\text{ppm Oxígeno Disuelto} = \frac{\text{ml Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{N} \cdot 8 \cdot 1000}{\text{ml frasco} - 4 \text{ ml}}$$

➤ **Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR):** En este apartado se presenta el Gráfico 13 correspondiente a los espectros del infrarrojo medio obtenidos de las muestras de PLA con y sin nanopartículas de sílice. La muestra de ácido poliláctico (PLA) en forma de film depositado sobre una pastilla de bromuro potásico (KBr) mediante el método de "casting" evaporación a partir de una disolución en acetona. (Ver Figura 14)

**Gráfico 13. Espectros del PLA en el infrarrojo medio**



Fuente: Arie Raw, "Fundamentals of Polymer Engineering", Chapter 3. Pág 33.

Se observa el pico de mayor valor de absorbancia situado a unos 1759 cm<sup>-1</sup> y una serie de picos sucesivos que van desde 1500 a 1000 cm<sup>-1</sup> en los que destacan los situados a 1185 y 1091 cm<sup>-1</sup> que corresponden a las absorciones asociadas al grupo C-O-C y en la región de 830 a 960 cm<sup>-1</sup> que corresponde al grupo CH<sub>3</sub>.

**Figura 11. Materia prima de lactosuero analizado en el laboratorio químico (DLABSP)**



**Figura 12. Determinación pH del lactosuero**



**Figura 13. Determinación de proteínas del lactosuero**



**Figura 14. Equipo de polimerización del PLA**



#### 4.3. DISPONIBILIDAD DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada es el lactosuero producto de la coagulación de leche en el cuajado, procedente en la fabricación del queso. Son tres las principales cuencas lecheras, que cuenta con la producción de leche fresca en torno a los departamentos de Cajamarca (25.7%), Lima (19.4%) y Arequipa (24.7%) produciéndose el 70% de la producción nacional. Este año 2013 se estima obtener unos 500000 L/día, es decir un 20% más en comparación al mismo período del 2012, se sabe que por lo general el 90% de leche procesada en la industria quesera es lactosuero, por lo tanto la disponibilidad es 450000 L/día de lactosuero para la obtención del ácido poliláctico (PLA).

Según el procedimiento de coagulación de la leche utilizado para separar la cuajada del queso, se obtendrá el lactosuero dulce o lactosuero ácido. La composición fisicoquímica del lactosuero se detalla a continuación en la Tabla 14.

**Tabla 14. Composición fisicoquímica del lactosuero dulce y ácido**

Propiedades	Tipo de lactosuero	
	SUERO DULCE	SUERO ÁCIDO
Agua	93-95 %	93-95 %
Extracto seco	5 -7 %	5 -7 %
Lactosa	4.5 - 5.3 %	3.8 - 5.2 %
Proteínas	0.6 - 1.1 %	0.2 - 1.1 %
Grasas	0.1 - 0.4 %	0.1 - 0.5 %
Sales minerales	0.5 - 0.7 %	0.5 - 1.2 %
Ácido láctico	0.1 - 0.2 %	0.2 - 1.2 %
Cloruros	0.15 - 0.6 %	0.16 - 0.6 %
Finos	0.05 - 0.3 %	0.5 - 0.7 %
Densidad	1.025 g/ml	1.027 g/ml
Valor de pH	6.45	5

Elaboración propia Fuente basada: "Caracterización Fisicoquímica de Polímeros", Pág. 15-19

# CAPÍTULO V

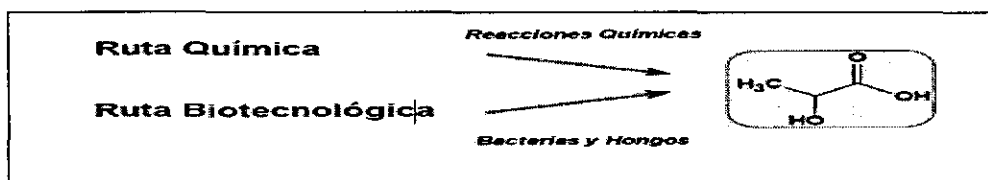
## SELECCIÓN Y DISEÑO DEL PROCESO

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En los proyectos de diseño de plantas, existen un sin número de operaciones y procesos que hacen posible su funcionamiento. En este capítulo se evaluará más eficientemente el proceso de ácido poliláctico (PLA), la selección correcta del proceso, descripción pormenorizada y en forma detallada; incluyendo el diagrama de flujo del proceso, diagrama de bloques, su balance de materia y energía en cada equipo. Para ello se necesitará saber el o los diferentes procesos de manufactura así como ventajas y desventajas a fin de elegir el proceso más adecuado. El diseño de reactores prepolimerización y polimerización contribuye una futura instalación de una planta para la producción de ácido poliláctico.

### 5.2 PROCESOS DE MANUFACTURA DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

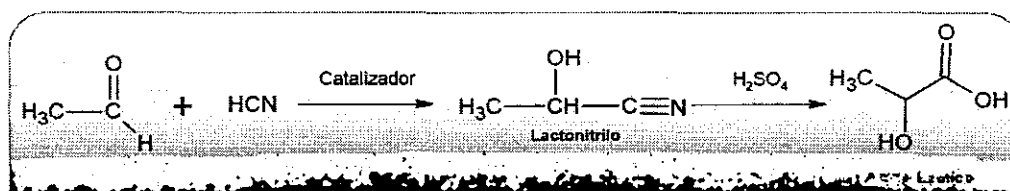
Existen dos procesos básicos de obtención de ácido láctico (LA) que consisten en las rutas química y biotecnológica:



Actualmente la ruta biotecnológica produce más del 95% del consumo mundial de LA. No obstante, existen algunas alternativas que vienen siendo estudiadas y que podrían llegar a ser competitivas en algunas aplicaciones industriales del LA.

#### 5.2.1 Proceso por vía química

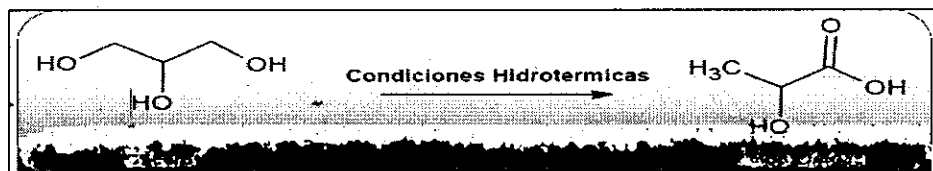
En la producción de LA a escala industrial; es una ruta que se basa en reacciones de adición, para la formación de cianohidrinas, por la cual se obtiene ácido láctico (LA).



La obtención de LA por ésta ruta incluye múltiples reacciones hasta obtener el producto final, tales como:

- Adición ácido cianhídrico a acetaldehído.
- Hidrólisis del lacto nitrilo.
- Esterificación del LA y posterior destilación azeotrópica.
- Hidrólisis para obtención del éster obtenido.

El grupo de Biorefinería de Fundación LEIA ha desarrollado una ruta química de obtención de LA a partir de glicerol crudo obtenido de la transesterificación de aceites en el proceso de producción de Biodiesel.



El proceso consiste en una reacción hidrotérmica bajo la que se obtienen rendimientos superiores al 90% mol, con concentraciones finales de hasta 280 g/L. Este proceso está en fase de transferencia tecnológica, con la búsqueda de empresas interesadas en el desarrollo a escala industrial.

### 5.2.2 Proceso por vía biotecnológica

La ruta biotecnológica consiste en la fermentación de carbohidratos con bacterias y hongos, aunque industrialmente está más extendida la fermentación vía bacteriana. Una de las principales ventajas de las rutas biotecnológicas, es la obtención de una forma ópticamente pura del ácido de LA en sus formas enantioméricas, y no como mezcla racémica. Por vía fermentativa discurre básicamente a través de cuatro etapas:

- Fermentación del ácido láctico.
- Hidrólisis del lactato de calcio.
- Esterificación y destilación.
- Hidrólisis del éster.

Sin embargo los procesos comerciales se basan en la utilización de bacterias termófilas, fermentación rápida y eficiente, que permitan el uso de sustratos baratos, con mínima adición de nutrientes. Las principales características de este grupo de bacterias es que son homofermentativas, lo cual facilita la separación y aumenta el rendimiento del proceso.

Algunos de los sustratos más empleados en la fermentación láctica son: sucrosa de caña de azúcar, remolacha azucarera, lactosa de lactosuero y dextrosa de almidones hidrolizados.



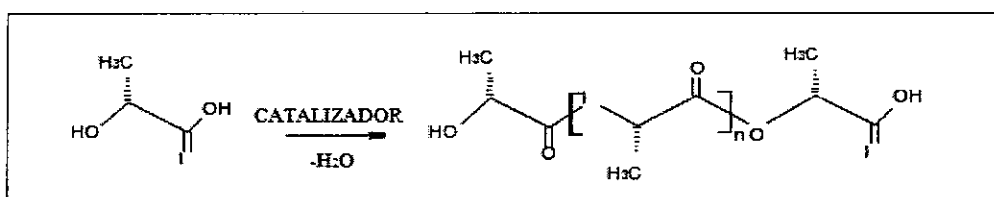
### 5.2.3. Procesos de obtención del ácido poliláctico (PLA)

El biopolímero ácido poliláctico (PLA) se forma por: Policondensación directa de ácido láctico y por Vía cíclica con un intermediario dímero.

#### a) Policondensación de ácido láctico

Este proceso envuelve la remoción de agua por condensación y el uso de un solvente en alto vacío y temperatura (fue usado por Carothers quien descubrió el PLA en el año 1932). Con esta ruta, sólo polímeros de bajo peso molecular pueden ser producidos, debido principalmente a las dificultades en la remoción de agua e impurezas. Otras desventajas de esta ruta es que utiliza un reactor de gran tamaño, necesita de evaporación y recuperación del solvente. (Ver Figura 15)

Figura 15. Ruta por policondensación del ácido láctico



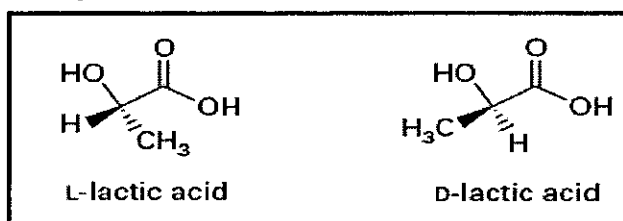
#### b) Polimerización por anillo abierto (ROP)

Este método es mucho mejor para producir un polímero de alto peso molecular y ha sido actualmente adaptado comercialmente a las necesidades debido a la fermentación del almidón que ha reducido significativamente los costos en la producción del ácido láctico.

La fermentación del azúcar produce ácido láctico quiral, las moléculas quiral existen como estereoisómeros, el ácido láctico puede existir como  $L^{(+)}$  o  $D^{(-)}$ .

El ácido láctico sintetizado químicamente da una mezcla 50%  $D^{(-)}$  y 50%  $L^{(+)}$ ; sin embargo la fermentación es muy específica, permitiendo la producción esencialmente de un estereoisómero. La fermentación homoláctica derivada de ácido láctico consiste en 99.5% del isómero  $L^{(+)}$  y 0.5% del isómero  $D^{(-)}$  mezcla racémica. (Ver Figura 16)

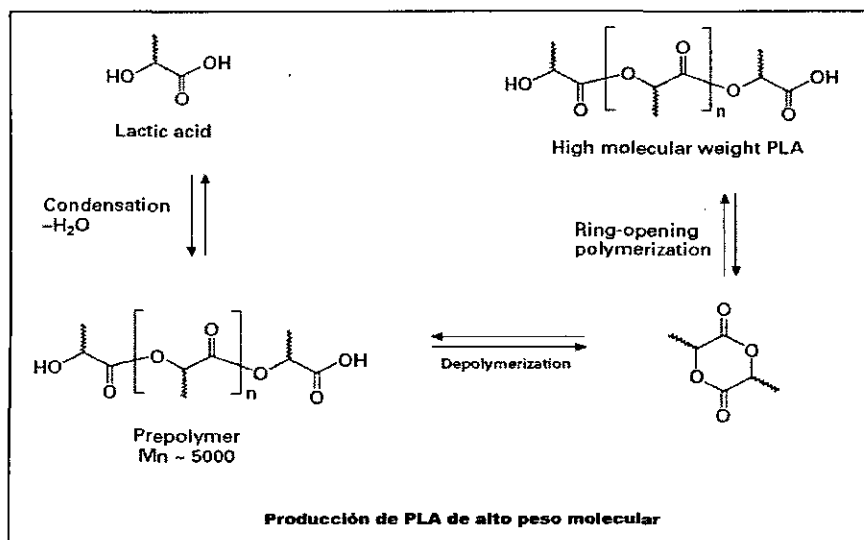
Figura 16. Estereoisómeros del ácido láctico



Fuente: Química Orgánica T.W.G. Solomons

El proceso está basado en remover agua sin solvente para producir un dímero intermediario (lactida), por presión al vacío. La polimerización en anillo del dímero es lograda mediante calor; controlando la pureza del dímero, es posible producir un rango variado de moléculas pesadas, variando la cantidad y secuencia de las unidades en el polímero; las propiedades del producto pueden ser cambiadas. Estos cambios impactan en el comportamiento frente a la capacidad de derretirse, propiedades térmicas y ductibilidad. (Ver Figura 17)

**Figura 17. Ruta por polimerización rompimiento de anillo (ROP)**



Fuente: Del Ángel D. Estudio y síntesis en la producción de Ácido Poliláctico (PLA)

Luego, el dímero o lactida es convertido en una mixture de estereoisómeros usando catálisis para aumentar la velocidad y selectividad de la reacción cíclica intramolecular. Finalmente, el biopolímero de PLA es producido usando un catalizador de estaño; luego que la polimerización se completa, cualquier monómero remanente es removido y recirculado al inicio del proceso.

### 5.3 SELECCIÓN DEL PROCESO

De acuerdo a los métodos para obtener el biopolímero ácido poliláctico (PLA); se ha creído convenientemente seleccionar la obtención de este producto por reacciones bacteriológicas, ya que sintéticamente se produce esencialmente en forma racémica (ópticamente inactiva).

Hoy en día la fabricación industrial de este compuesto a nivel mundial se hace por vía fermentativa. En este estudio se usará el método de polimerización por apertura del anillo (ROP), debido a los bajos costos de operación, eficiencia y rendimiento del proceso. Siendo en nuestro país dicho proceso químico una alternativa de innovación tecnológica, llegando a obtener un biopolímero de alto peso molecular, buena elongación y resistencia al impacto.

## 5.4 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA DEL PROCESO

### 5.4.1 Descripción pormenorizada del proceso

La leche es uno de los alimentos más completos que existe en la naturaleza por su alto valor nutritivo, por lo que es una mezcla muy compleja-heterogénea en la cual los minerales y los carbohidratos se encuentran disueltos; las proteínas están en forma de suspensión y las grasas como pequeñas partículas insolubles en agua. El lactosuero es el líquido que se separa de la leche cuando ésta se coagula para la obtención del queso, son todos los componentes que no se integran en la coagulación de la caseína.

#### 5.4.1.1 Almacenamiento de materia prima:

La principal materia prima del proceso es el lactosuero con un pH igual a 6.5, es un sistema heterogéneo, con el tamaño de grasa siguiendo una distribución de las partículas tienen una forma irregular con un diámetro de 1 mm, se desnaturaliza a temperaturas mayores de 70 °C. En la Tabla 15 se detalla la composición química del lactosuero que utilizaremos como materia prima para nuestro proceso del PLA.

Tabla 15. Composición química del lactosuero para el proceso

COMPONENTE	LACTOSUERO (%P/P)
Humedad (H <sub>2</sub> O)	93.1 %
Lactosa	4.9 %
Proteínas	0.9 %
Cenizas (Minerales)	0.6 %
Grasas	0.3 %
Vitaminas	0.2 %

Fuente: Lactosuero importancia en la industria de alimentos

#### 5.4.1.2 Almacenamiento de insumos químicos:

Los insumos químicos utilizados principalmente en el proceso se detallan a continuación a tomarse en cuenta para su respectivo almacenamiento.

El ácido sulfúrico es un líquido higroscópico, incoloro, aceitoso e inodoro; se trata de un compuesto corrosivo, reacciona violentamente con agua y compuestos orgánicos. Para su almacenamiento será un tanque atmosférico en forma cilíndrica con fondo superior cónico con un techo para cubrir la zona en caso de lluvias, pero accesibles a toda su superficie exterior. El hidróxido de calcio (lechada de cal), es una solución básica en suspensión por ser ligeramente soluble en agua, para su almacenamiento será un tanque vertical con tapa tipo plato estándar.

El agua de red para el proceso químico una parte debe ser descalcificada para evitar problemas de ensuciamiento e incrustaciones en los equipos del proceso como en la caldera, torre de enfriamiento, intercambiadores de calor y reactores; sobre las superficies que presentan algún tipo de transferencia térmica. Mientras que el agua destinada a la limpieza general de la planta, el agua contra incendios y el agua destinada a uso personal (vestuarios, lavaderos, comedores, etc.) no tiene que ser sometida a ningún proceso de descalcificación.

#### **5.4.1.3 Prefiltración:**

El lactosuero es sometido por un proceso de prefiltrado en que se utiliza una malla de tela (Dril) fina de 0.1 mm de diámetro de poro, para retener todas las macropartículas que pudieran existir, evitar que la grasa que se recupere en el centrifugado y el suero pretratado que se utilizará en la microfiltración estén libres de pelusas, pelos o cualquier otra impureza que pudiera existir. Este pretratamiento se hace para evitar la obstrucción de los orificios de los platos y los canales de salida durante la centrifugación, y con eso evitar una disminución en la eficiencia del proceso.

#### **5.4.1.4 Centrifugado:**

Debido a la presencia de grasa en el lactosuero en forma de minúsculas gotas donde la mayoría tiene diámetros aproximados de 2 a 10  $\mu\text{m}$  es necesario el uso de una operación de centrifugación como pretratamiento para su separación del lactosuero. Para ello se utilizó una Centrífuga Wesfalia Separador AG, modelo LWA 205 de 12000 rpm. El centrifugado se utiliza a una temperatura de 30°C, antes de utilizar la tecnología de membranas de separación.

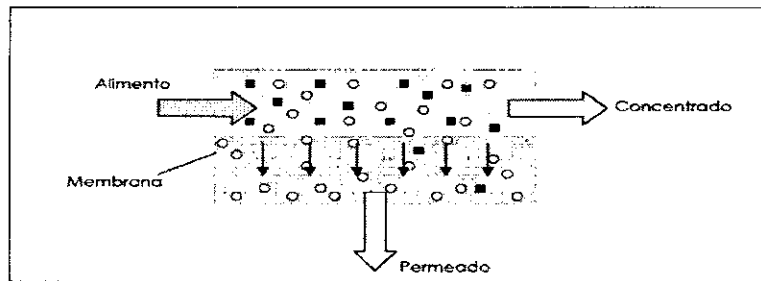
#### **5.4.1.5 Tecnología de membrana por ultrafiltración-diafiltración:**

La tecnología de separación por membrana trabaja sin la adición de productos químicos, con uso relativamente bajo de energía, con un procesamiento a bajas temperaturas y relativamente fáciles de realizar, se basa en la utilización de membranas semipermeables. Como descarga de esta operación siempre se obtienen dos corrientes: el permeado que contiene aquellos compuestos que son filtrados por la membrana semipermeable y el concentrado que se compone de las sustancias aprovechables que se desean mantener en el producto final.

La separación se fundamenta en la permeabilidad selectiva de un componente o más del líquido a través de la membrana y el gradiente de presión hidrostática.

Los procesos de membranas de filtración más importantes para la industria alimenticia son: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF) y Osmosis Inversa (OI). En la figura 17 se encuentra esquematizado el funcionamiento general de un proceso de separación por membrana, así como cada una de sus corrientes. (Ver Figura 18)

**Figura 18. Principio básico de operación de una membrana**

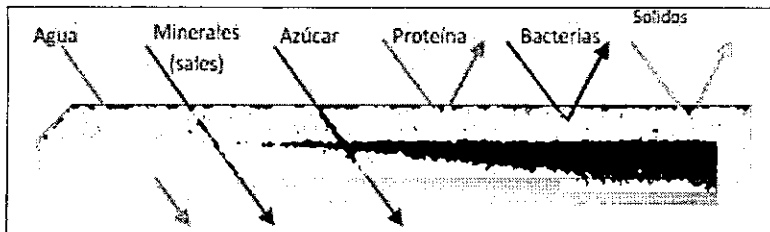


Fuente: Almecija 2010

La ultrafiltración es un proceso físico-químico de la separación del lactosuero mediante una membrana porosa; igualmente apunta que el agua y solutos de bajo peso molecular pasan influenciados por la presión, que es la fuerza impulsora y evita la colmatación en las membranas siendo el flujo tangencial a la superficie formando el permeado; mientras que las proteínas son retenidas por la membrana concentrándose junto con glóbulos grasos, bacterias y suspensiones de sólidos para formar el concentrado tal como se muestra en la figura 18. Esta membrana posee un tamaño de poro entre 2 a 100 nm., el rango de presiones de operación está entre 0.1-1 MPa (1 -10 bar).

Una de las características más importantes de las membranas de ultrafiltración, es la formación de una capa gel máxima determinada sobre la superficie de la membrana que limita la densidad de flujo. (Ver Figura 19)

**Figura 19. Operación de una membrana por ultrafiltración (UF)**



Fuente: Tratamiento y reutilización del suero de leche 2010

La operaciónn diafiltración consiste en ir agregando agua pura al tanque de alimentación para favorecer la eliminación de las sales presentes a través de la corriente proveniente de la ultrafiltración, para la obtención del permeado rico en lactosa para ser fermentada bacteriológicamente.

En este estudio se utilizó el modo continuo adicionando agua a una condición de pH y temperatura constante, de tal forma que el caudal del permeado sea igual al caudal de entrada en el tanque de alimentación del agua para la desmineralización respectiva.

#### **5.4.1.6 Fermentación bacteriológica en forma anaerobia**

El disacárido lactosa obtenido por tratamiento del lactosuero se siembra con el microorganismo *Lactobacillus Bulgaricus* que es homofermentativo y termófilo, porque se obtiene ácido láctico como producto principal. La instalación consta esencialmente, de un depósito para almacenamiento de la lactosa, un recipiente para almacenamiento del hidróxido de calcio, un tanque para la fermentación aséptica; con accesorios para mantener la temperatura constante hasta aproximadamente  $48 \pm 0.1^\circ \text{C}$  y para agitación del medio para facilitar la fermentación de la lactosa. Cada 6 horas aproximadamente se adiciona cantidades de hidróxido de calcio para mantener el pH entre 5.5 y 7.0.

La temperatura y el pH se mantienen en sus valores óptimos para que la fermentación de lactosa se produzca con la mayor rapidez posible en un tiempo de 42 a 48 horas.

El cultivo más adecuado para esta fermentación anaeróbica es el *Lactobacillus Bulgaricus* es un bacilo delgado Gram positivo, no móvil, que no forma esporas y capaz de convertir más del 90% de la lactosa en ácido láctico. Este cultivo prolifera rápidamente, en particular a temperaturas de 45 a 50 °C.

El medio de mantenimiento del cultivo para el *Lactobacillus Bulgaricus* es el agar y el caldo MRS, para mantenerlo es a 0.5 g de liofilización en 50 ml de caldo MRS.

Una vez incubado en las condiciones de 48 °C a 24 horas, se efectúa las inoculaciones sucesivas se emplea este medio como iniciador de la fermentación en el tanque principal.

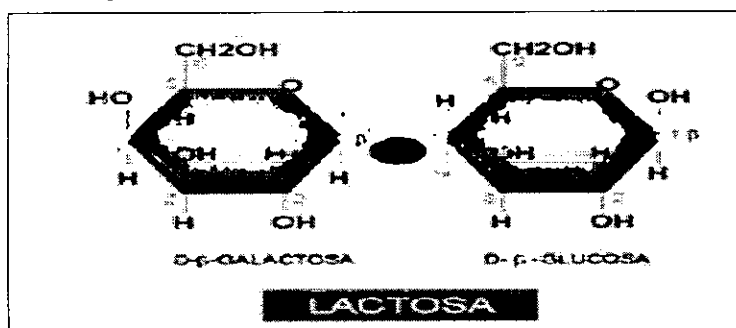
Se inocula el medio con 5% (v/v) del volumen total y se procede a incubar, realizando el control de esterilidad del medio, al sustrato se le adiciona tiamina en una proporción de 0.005% pues es un requerimiento vital para su crecimiento. Las bacterias empleadas en la producción de ácido láctico son de forma anaerobia.

Las bacterias lácticas necesitan determinados factores de crecimiento puede requerir de riboflavina y al menos otro activador como fuentes de nitrógeno orgánico soluble para su desarrollo normal. El rendimiento y el tiempo de fermentación dependen de la clase, cantidad y combinación de los alimentos.

#### **5.4.1.7 Obtención de lactosa a partir del lactosuero**

Se produce la hidrólisis del disacárido lactosa para desdoblar la molécula y obtener  $\beta$ -galactopiranosil y  $\beta$ -glucopiranososa, la molécula está unido por el enlace  $\beta$ -glicosídico. (Ver Figura 20).

Figura 20. Estructura molecular de la  $\beta$ -lactosa

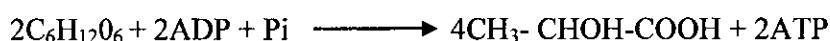


Fuente: Química Orgánica T.W.G. Solomons

En la fermentación anaeróbica estas bacterias convierten la lactosa (azúcar invertida) primero en galactosa y glucosa, y estas después en ácido láctico:



Reacción de mezcla racémica para obtener ácido láctico:



#### 5.4.1.8 Neutralización del ácido láctico

Durante las reacciones de fermentación el pH disminuye bruscamente, por lo que para mantenerlo cercano a la neutralidad se adicionan álcalis, el regulador seleccionado es  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esto es necesario porque a valores de pH ácidos disminuye la viabilidad y el desarrollo de los microorganismos, por tanto, disminuye el rendimiento de obtención del ácido láctico. Así mantener el pH óptimo entre 5.5 - 7 mediante la formación del lactato de calcio, para facilitar su filtración.

#### 5.4.1.9 Acidulación para recuperar ácido láctico

El lactato de calcio reacciona al añadir ácido sulfúrico industrial al 98% de pureza a una temperatura ambiente de reacción, dosificándose por medio de una bomba el concentrado del lactato de calcio para obtener ácido láctico recuperado y sulfato de calcio, que posteriormente será separado por filtración.

#### 5.4.1.10 Filtración y Decantación

Se bombea a través de un filtro rotatorio para remover la biomasa (carbohidratos, nitrógeno y nutrientes) que no fermentaron. También se utiliza filtro rotatorio para separar por filtración el precipitado sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) insoluble en ácido láctico, que se concentra en evaporadores hasta la medida deseada. El sulfato de calcio separado será enviado a un tanque colector para posteriormente a un tratamiento químico y ser utilizado como fertilizante agrícola. Se separa por decantación el lactato de calcio, ácido sulfúrico y agua, así como el catalizador de octoato de estaño para ser recuperado en el proceso.

#### **5.4.1.11 Evaporación**

El licor filtrado que contiene lactato de calcio pasa a un sistema de calentamiento para posteriormente alimentarlos a un evaporador estándar de tubos cortos verticales, para concentrarlos el licor hasta un 30% (p/p), y así evitar la cristalización del lactato de calcio. El licor libre de sulfato de calcio resultante de la reacción con ácido sulfúrico se envía a un evaporador de doble efecto, que opera a iguales condiciones que el anterior que concentra hasta más del 90% p/p, concentración requerida para el ácido láctico, se evapora para producir los grados deseados de pureza y concentración.

#### **5.4.1.12 Obtención del dímero lactida**

El ácido láctico obtenido en mayor concentración se almacena en taques de retención, luego se envía al reactor de prepolimerización de lactida que opera a condiciones de vacío de 500 mmHg y temperatura de 180°C, el ácido láctico para forma lactida y agua.

Este proceso dura 15 horas y tiene una conversión de 85 a 90% donde el ácido láctico sin reaccionar es recuperado y recirculado.

#### **5.4.1.13 Polimerización para obtención del ácido poliláctico (PLA)**

La lactida formada ingresa hacia el reactor de polimerización donde se carga junto al catalizador octoato de estaño (2-etil hexanoato de estaño) a una concentración de 5.0% en peso y se requerirá de un iniciador alcohol isopropílico ( $C_3H_8O$ ) para llevar a cabo la reacción con un 10.0% del total de la corriente de alimentación, donde se recircula el dímero lactida.

La polimerización es en masa por lo que no se requiere de disolventes, dura aproximadamente 7 horas con temperaturas entre 100-200°C en donde se obtiene el polímero de alto peso molecular que es el ácido poliláctico (PLA), producto de gran valor agregado en la industria de biopolímeros ( $10^4$  a  $10^5$  g/mol). El ácido poliláctico sale en forma de gel el cual se enfría al ambiente hasta hacerse sólido y pasa por un sistema de cuchillas para obtener la forma requerida y finalmente almacenarla.

#### **5.4.2 Diagrama de flujo del proceso (flow sheet)**

El diagrama de flujo representa gráficamente los equipos principales y auxiliares del proceso para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero. Se ha desarrollado en el programa de Chemcad 5.2.0 donde establece la simbología, la secuencia del proceso químico para la obtención del ácido poliláctico (PLA), tal como se muestra en el Gráfico 14 que representa el diagrama de flujo del proceso.



### **5.4.3 Diagrama de bloques del proceso**

Es la representación gráfica abreviada del proceso químico relacionado al balance de materia y/o energía; en él se muestra las entradas y salidas de los equipos del proceso para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero esquematizados en forma rectangular, tal como se muestra en el Gráfico 15.

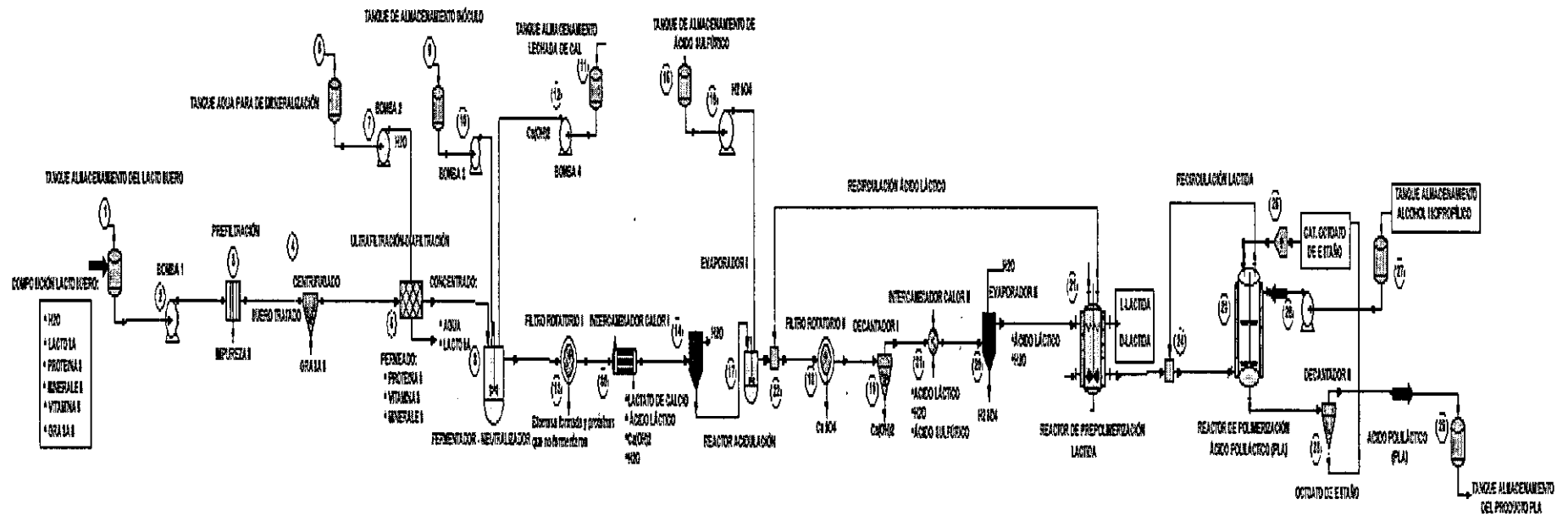
### **5.4.4 Balance de materia del proceso**

Las leyes de conservación de la materia ocupan un lugar muy importante para el análisis de los procesos industriales, en la evaluación económica, en el control del proceso y en la optimización del mismo. Para plantear correctamente el balance de materiales es necesario establecer una base de cálculo relacionado con el tiempo, a partir de la capacidad de planta proyectada al año 2022 es de 210710.2 TMPA, para determinar la cantidad de producción anual del ácido poliláctico (PLA) es del 75% respecto a la capacidad de planta resultando 158032.6 TMPA; puesto que ningún equipo o persona puede trabajar continuamente sin presentar errores, además los productos suelen presentar una inferencia entre sí, la cual operará 335 días por año. En la Tabla 16 se muestra al detalle el balance de materia del proceso químico.

### **5.4.5 Balance de energía del proceso**

El balance de energía es normalmente más complejo que el balance de materia, debido a que la energía puede transformarse de unas formas a otras (mecánica, térmica, química, etc.), lo que obliga a considerar este aspecto en las ecuaciones. En general el balance de energía es imprescindible en equipos principales y auxiliares en los que el intercambio de energía sea determinante, lo que fundamentalmente sucederá en intercambiadores de calor, evaporadores, bombas, reactores químicos, filtros, etc. En la Tabla 17 se muestra al detalle el balance de energía del proceso químico.

Gráfico 14. Diagrama de flujo del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero



TESIS: "ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO - ECONÓMICO PARA LA PRODUCCIÓN DEL BIOPOLÍMERO ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) A PARTIR DEL LACTOSUERO"

Date:

Br. KARINA MERCEDES YAMUNAQUE CHERO

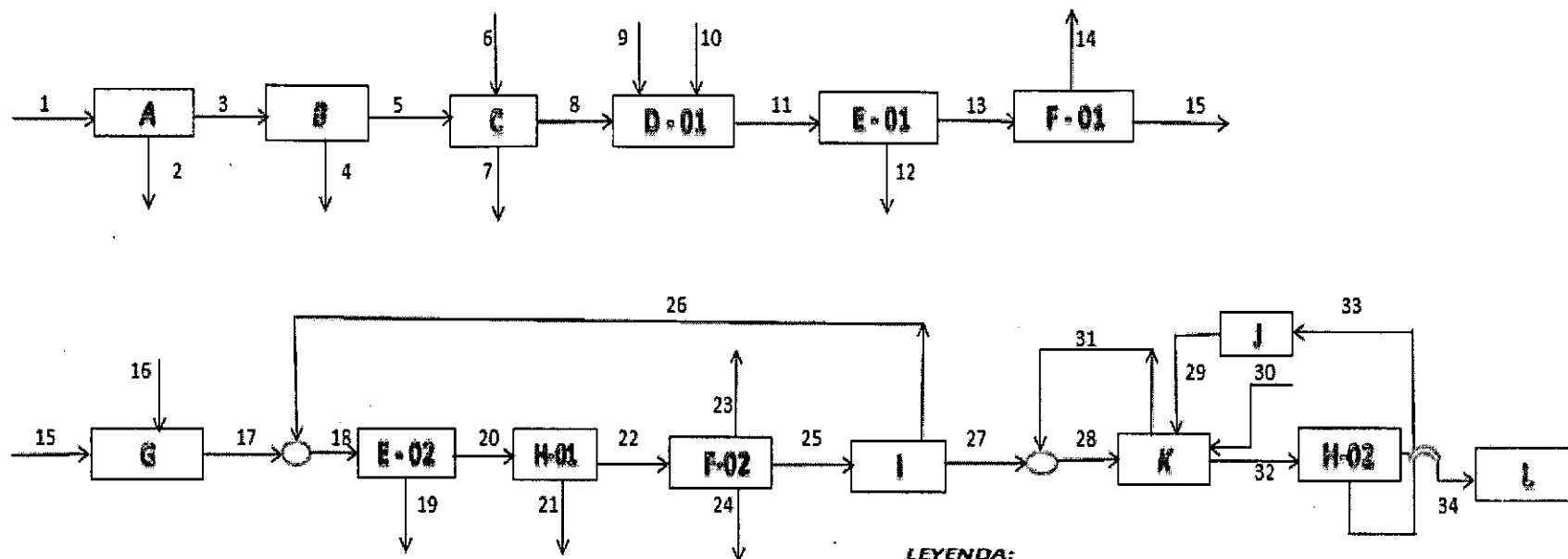
Checked:

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

Approved:

Ing. Msc. GUIDO TICONA OLARTE  
Ing. CLAUDIO RODRÍGUEZ GÓMEZ

Gráfico 15. Diagrama de bloques del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero



**LEYENDA:**

A: PREFILTRADO

B: CENTRIFUGADO

C: ULTRAFILTRACIÓN - DIAFILTRACIÓN

D-01: FERMENTADOR - NEUTRALIZADOR

E-01, E-02: FILTROS ROTATORIOS I y II

F-01, F-02: EVAPORADORES I y II

G: REACTOR DE ACIDULACIÓN

H-01, H-02: DECANTADOR I y II

I: REACTOR DE PREPOLIMERIZACIÓN LÁCTIDA

J: TANQUE ALMACENAMIENTO CATALIZADOR OCTOATO DE ESTAÑO

K: REACTOR DE POLIMERIZACIÓN ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

L: TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE PLA

**Tabla 16. Balance de Materia del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero**

COMPONENTES	CORRIENTES (kg/h)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MINERALES	147.4		147.1		147.1		147.1		
LACTOSA	1203.9		1201.0		1201.0			1201.0	
H <sub>2</sub> O	22874.7		22818.8		22818.8	833.4		23652.2	
PROTEINAS	221.1		220.6		220.6		220.6		
VITAMINAS	49.1		49.0		49.0		49.0		
GRASAS	73.7		73.5	73.5					
IMPUREZAS		60.0							
INOCULO (5%V/V)									828.1
TOTAL	24570.0	60.0	24510.0	73.5	24436.5	833.4	416.7	24853.2	828.1

COMPONENTES	CORRIENTES (kg/h)											
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
AGUA		23341.1	23.3	23317.8	6995.4	16322.4		16638.5	21626.4		21626.4	108.1
LACTOSA												
ACIDO LACTICO		1573.2		1573.2		1573.2		2367.3	2970.8		2970.8	
BIOMASA NO FERMENTADA		23.9	23.9									
Ca(OH) <sub>2</sub>	496.5	114.7		114.7		114.7		62.9	62.9		62.9	62.9
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>							1588.5	293.0	293.0		293.0	
CaSO <sub>4</sub>								1194.1	1194.1	1194.1		
LACTATO DE CALCIO		1124.9		1124.9		1124.9		167.9	167.9		167.9	167.9
TOTAL	496.5	26177.8	47.2	26130.6	6995.4	19135.2	1588.5	20723.7	26315.1	1194.1	25121.0	338.9

COMPONENTES	CORRIENTES (kg/h)												
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
AGUA	21518.3	17214.6		4303.7	4987.9								
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	293.0		293.0										
ACIDO LACTICO	2970.8			2970.8	603.5								
CATALIZADOR OCTOATO DE ESTAÑO								855.9			855.9	855.9	
INICIADOR ALCOHOL ISOPROPILICO									17972.9				
LACTIDA						1583.1	2805.2			1122.1			
PLA											19656.0		19656.0
TOTAL	24782.1	17214.6	293.0	7274.5	5591.4	1683.1	2805.2	855.9	17972.9	1122.1	20511.9	855.9	19656.0

Tabla 17. Balance de Energía del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero

BALANCE DE ENERGÍA														
COMPONENTES	CORRIENTES													
	1'	1	W-P1	2	3	Q-PREF	4	5	Q-CENTRIF					
	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-1	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-2	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)
MINERALES	147.4	0.0060	147.4	0.0060		0.0000	147.1	0.0060		0.0000	147.1	0.0060		
LACTOSA	1203.9	0.0490	1203.9	0.0490		0.0000	1201.0	0.0490		0.0000	1201.0	0.0491		
H2O	22874.7	0.9310	22874.7	0.9310		0.0000	22818.8	0.9310		0.0000	22818.8	0.9338		
PROTEÍNAS	221.1	0.0090	221.1	0.0090		0.0000	220.6	0.0090		0.0000	220.6	0.0090		
VITAMINAS	49.1	0.0020	49.1	0.0020		0.0000	49.0	0.0020		0.0000	49.0	0.0020		
GRASAS	73.7	0.0030	73.7	0.0030		0.0000	73.5	0.0030		73.5	0.0000		0.0000	
IMPUREZAS		0.0000		0.0000	60.0	1.0000		0.0000			1.0000		0.0000	
INOCULO (5% V/V)		0.0000		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000	
TOTAL	24570.0	1.0000	24570.0	1.0000	60.0	1.0000	24510.0	1.0000		73.5	1.0000	24436.5	1.0000	
FLUJO MOLAR (kmol/h)	1275.0		1275.0		0.2384		1274.2			0.2147		1293.5		
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	19.275		19.275		251.69		19.275			342.30		18.892		
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	24.04		24.04		0.04003		23.982			0.04854		24.08		
TEMPERATURA (°C)	25.0		25.0		25.0		25.0		25.0	28.0		25.0		28.0
PRESIÓN (atm)	1.00		1.10		1.10		1.18		1.18	1.08		1.10		1.10
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	1038.1		1038.1		1535.4		1038.1			1505.5		1029.0		
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-3.732E+08		-3.732E+08		262.973	-4.163E+05	-3.727E+08		-7.463E+08	-4.963E+05		-3.756E+08		3.702E+08
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)					7.305E-02				2.073E+05					1.028E+05
FASE	L		L		L		L		L		L		L	
FRACCIÓN MASCICA DE VAPOR	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	

BALANCE DE ENERGÍA														
COMPONENTES	CORRIENTES													
	6'	6	W-P2	7	8	Q-DUF	9'	9	W-P3					
	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-4	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-5	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)
MINERALES		0.0000		0.0000		147.1	0.3529		0.0000			0.0000		0.0000
LACTOSA		0.0000		0.0000		0.0000	1201.0	0.0483				0.0000		0.0000
H2O	833.4	1.0000	833.4	1.0000		0.0000	23652.2	0.9517				0.0000		0.0000
PROTEÍNAS		0.0000		0.0000		220.6	0.5294		0.0000			0.0000		0.0000
VITAMINAS		0.0000		0.0000		49.0	0.1176		0.0000			0.0000		0.0000
GRASAS		0.0000		0.0000		0.0000	0.0000		0.0000			0.0000		0.0000
IMPUREZAS		0.0000		0.0000		0.0000	0.0000		0.0000			0.0000		0.0000
INOCULO (5% V/V)		0.0000		0.0000		0.0000	0.0000		0.0000		828.1	1.0000	828.1	1.0000
TOTAL	833.4	1.0000	833.4	1.0000	416.7	1.0000	24853.2	1.0000			828.1	1.0000	828.1	1.0000
FLUJO MOLAR (kmol/h)	46.26		46.26		1.2174		1340.0				4.597		4.597	
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	18.015		18.015		342.3		18.862				180.16		180.16	
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	0.8351		0.8351		0.2752		24.91				0.7012		0.7012	
TEMPERATURA (°C)	18.0		25.0		25.0		25.0		25.0	18.0		18.0		25.0
PRESIÓN (atm)	0.95		1.09		1.09		1.09		1.18	1.00		1.09		1.09
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	1007.3		1007.3		1507.6		1028.3			1181.0		1181.0		
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-1.320E+07		-1.318E+07		13.90	-2.816E+06	-3.888E+08		-2.836E+06	-3.919E+05		-3.919E+05		3.443E+00
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)					3.861E-03				7.878E+02					9.564E-04
FASE	L		L		L		L		L		L		L	
FRACCIÓN MASCICA DE VAPOR	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	

Tabla 17. Balance de Energía del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero

BALANCE DE ENERGÍA															
COMPONENTES	CORRIENTES														
	10'		10		W-P4	11		RX-FERREU	12		13		FROT-1	13'	
	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-7	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-8	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-9	(kg/h)	Fracción (Xi)
AGUA		0.0000		0.0000		23341.1	0.8916		23.3	0.4941	23317.8	0.8924		23317.8	0.8924
LACTOSA		0.0000		0.0000			0.0000			0.0000		0.0000			0.0000
ACIDO LACTICO		0.0000		0.0000		1573.2	0.0601			0.0000	1573.2	0.0602		1573.2	0.0602
BIOMASA NO FERMENTADA		0.0000		0.0000		23.9	0.0009		23.9	0.5059		0.0000			0.0000
Ca(OH)2	496.5	1.0000	496.5	1.0000		114.7	0.0044			0.0000	114.7	0.0044		114.7	0.0044
H2SO4		0.0000		0.0000			0.0000			0.0000		0.0000			0.0000
CaSO4		0.0000		0.0000			0.0000			0.0000		0.0000			0.0000
LACTATO DE CALCIO		0.0000		0.0000		1124.9	0.0430			0.0000	1124.9	0.0430		1124.9	0.0430
TOTAL	496.5	1.0000	496.5	1.0000		26177.8	1.0000		47.2	1.0000	26130.6	1.0000		26130.6	1.0000
FLUJO MOLAR (kmol/h)	6.709		6.709			1319.0			1.427		1321.0			1321.0	
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	74.00		74.00			19.795			33.080		19.788			19.788	
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	0.2246		0.2246			25.44			0.04359		25.46			25.46	
TEMPERATURA (°C)	18.0		18.0		18.0	48.0		48.0	30.0		25.0		30.0	80.0	
PRESIÓN ( atm)	1.00		1.18		1.18	2.00		2.00	1.50		1.00		1.50	0.13	
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	2211.0		2211.0			1026.5			1083.8		1026.5			1026.5	
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-1.454E+04		-1.453E+04		6.058	-3.780E+08		1.098E+07	-3.790E+05		-3.808E+08		-3.179E+06	-3.198E+08	
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)					1.686E+03			3.049E+03					8.831E+02		
FASE	L		L		L	L		L	L		L		L	L-V	
FRACCIÓN MASICA DE VAPOR	0.0		0.0		0.0	0.0		0.0	0.0		0.0		0.0	0.993	

BALANCE DE ENERGÍA															
COMPONENTES	CORRIENTES														
	AGUA VAPOR 1		AGUA FRÍA 1		Q-E1	14		15		Q-EVAP1	15'		16		W-P5
	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-10	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-11	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-12
AGUA	1230000.0	1.0000	1230000.0	1.0000		6995.4	1.0000	16322.4	0.8530			0.0000		0.0000	
LACTOSA		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000			0.0000		0.0000	
ACIDO LACTICO		0.0000		0.0000			0.0000	1573.2	0.0822			0.0000		0.0000	
BIOMASA NO FERMENTADA		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000			0.0000		0.0000	
Ca(OH)2		0.0000		0.0000			0.0000	114.7	0.0060			0.0000		0.0000	
H2SO4		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000		1588.5	1.0000	1588.5	1.0000	
CaSO4		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000			0.0000		0.0000	
LACTATO DE CALCIO		0.0000		0.0000			0.0000	1124.9	0.0588			0.0000		0.0000	
TOTAL	1230000.0	1.0000	1230000.0	1.0000		6995.4	1.0000	19135.2	1.0000		1588.5	1.0000	1588.5	1.0000	
FLUJO MOLAR (kmol/h)	66780.0		66780.0			388.3		344.5			17.64		17.64		
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	18.015		18.015			18.015		75.855			98.074		98.074		
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	1206.0		1206.0			7.010		15.98			0.873		0.873		
TEMPERATURA (°C)	150.0		120.0		115.0	81.7		81.7		81.7	18.0		17.95		18.0
PRESIÓN (atm)	2.50		0.52		1.30	0.50		0.50		0.60	1.00		2.50		2.48
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	997.9		997.9			997.9		1197.1			1819.7		1819.7		
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-1.582E+10		-1.588E+10		6.132E+07	-9.285E+07		-1.343E+08		9.265E+07	-1.553E+07		-1.553E+07		170.8
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)					1.703E+04					2.574E+04					0.05
FASE	V		V		L-V	V		L		L-V	L		L		L
FRACCIÓN MASICA DE VAPOR	1.0		1.0		0.993	1.0		0.0		0.993	0.0		0.0		0.0

Tabla 17. Balance de Energía del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero

BALANCE DE ENERGÍA															
COMPONENTES	CORRIENTES														
	17		RX-ACID	18		19		20		FROT-2	21		22		Q-DEC1
	(kg/h)	Fracción (X)	EQUIP-13	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	EQUIP-14	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	EQUIP-15
AGUA	16638.5	0.8029		21626.4	0.8218	0.0000		21626.4	0.8609		108.1	0.3190	21518.3	0.0000	
LACTOSA		0.0000			0.0000	0.0000			0.0000			0.0000		0.0000	
ACIDO LACTICO	2367.3	0.1142		2970.8	0.1129	0.0000		2970.8	0.1183			0.0000	2970.8	0.0000	
BIOMASA NO FERMENTADA		0.0000			0.0000	0.0000			0.0000			0.0000		0.0000	
Ca(OH)2	62.9	0.0030		62.9	0.0024	0.0000		62.9	0.0025		62.9	0.1856		0.0000	
H2SO4	293.0	0.0141		293	0.0111	0.0000		293.0	0.0117			0.0000	293.0	1.0000	
CaSO4	1194.1	0.0576		1194.1	0.0454	1194.1	1.0000		0.0000			0.0000		0.0000	
LACTATO DE CALCIO	167.9	0.0081		167.9	0.0064	0.0000		167.9	0.0067			0.4954		0.0000	
TOTAL	20723.7	1.0000		26315.1	1.0000	1194.1	1.0000	25121.0	1.0000		338.9	1.0000	24782.1	1.0000	
FLUJO MOLAR (kmol/h)	963.7			1247.0		8.780		1239.0			8.002		1230.0		
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	21.504			21.097		136.0		20.282			42.353		20.146		
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	19.42			24.92		0.5147		24.41			0.2491		24.15		
TEMPERATURA (°C)	30.0		48.0	45.0		45.0		45.0		45.0	45.0		45.0		45.0
PRESIÓN ( atm)	1.80		2.00	1.50		1.00		1.00		1.20	0.50		0.50		1.00
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	1068.9			1055.8		2320.0		1029.1			1360.4		1026.1		
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-2.835E+08		-1.323E+03	-3.666E+08		9.966E+04		-3.667E+08		-1.40E+02	-1.661E+06		-3.649E+08		1.190E+05
POTENCIA DEL EQUIPO (KW)			3.674E-01							3.889E-02					33.058
FASE	L		L	L		L		L		L	L		L		L
FRACCIÓN MASICA DE VAPOR	0.0		0.0	0.0		0.0		0.0		0.0	0.0		0.0		0.0

BALANCE DE ENERGÍA																
COMPONENTES	CORRIENTES															
	22		AGUA VAPOR 2		AGUA FRÍA 2		Q-E2	23		24		25		Q-EVAP1	26	
	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	EQUIP-18	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	(kg/h)	Fracción (X)	EQUIP-17	(kg/h)	Fracción (X)
AGUA	21518.3	0.8683	1212000.0	1.0000	1212000.0	1.0000		17214.6	1.0000		0.0000	4303.7	0.5918		4387.9	0.8921
H2SO4	293.0	0.0118		0.0000		0.0000			0.0000	293.0	1.0000		0.0000			0.0000
ACIDO LACTICO	2970.8	0.1159		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000	2970.8	0.4064		603.5	0.1079
CATALIZADOR OCTOATO DE ESTANO		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000		0.0000			0.0000
INICIADOR ALCOHOL ISOPROPILICO		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000		0.0000			0.0000
LACTIDA		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000		0.0000			0.0000
PLA		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000		0.0000		0.0000			0.0000
TOTAL	24782.1	1.0000	1212000.0	1.0000	1212000.0	1.0000		17214.6	1.0000	293.0	1.0000	7274.5	1.0000		5591.0	1.0000
FLUJO MOLAR (kmol/h)	1230.0		67300.0		67300.0			955.8		2.987		272.0			283.8	
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	20.146		18.015		18.015			18.015		98.074		26.745			11.68	
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	24.15		1215.0		1215.0			17.025		0.1583		6.746			5.492	
TEMPERATURA (°C)	30.0		140.0		100.0		115.0	120.0		80.0		80.0		80.0	100.0	
PRESIÓN (atm)	1.50		1.00		0.53		1.30	1.20		1.20		1.20		1.20	0.66	
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	1026.1		1214.5		1214.5			1011.1		1851.0		1078.3				
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-3.603E+08		-1.605E+10		-1.605E+10		4.647E+06	-2.273E+08		2.300E+08		2.420E+08		-1.321E+08	-7.052E+07	
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)							1.291E+03							-3.669E+04		
FASE	L		V		V		V	V		L		L			L-V	
FRACCIÓN MASICA DE VAPOR	0.0		1.0		1.0		1.0	1.0		0.0		0.0			0.9808	

Tabla 17. Balance de Energía del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero

BALANCE DE ENERGÍA																
COMPONENTES	CORRIENTES															
	RECIR-1 EQUIP-18	27		RX-PREPOLIM		28		29		30		30		W-P6	31	
		(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-19	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	(kg/h)	Fracción (Xi)	EQUIP-20	(kg/h)	Fracción (Xi)	
AGUA			0.0000			0.0000		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000	
H2SO4			0.0000			0.0000		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000	
ACIDO LACTICO			0.0000			0.0000		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000	
CATALIZADOR OCTOATO DE ESTANO			0.0000			0.0000	855.9	1.0000		0.0000		0.0000			0.0000	
INICIADOR ALCOHOL ISOPROPILICO			0.0000			0.0000		0.0000	17972.9	1.0000	17972.9	1.0000			0.0000	
LACTIDA		1683.1	1.0000		2805.2	1.0000		0.0000		0.0000		0.0000		1122.1	1.0000	
PLA			0.0000			0.0000		0.0000		0.0000		0.0000			0.0000	
TOTAL		1683.1	1.0000		2805.2	1.0000	855.9	1.0000	17972.9	1.0000	17972.9	1.0000		1122.1	1.0000	
FLUJO MOLAR (kmol/h)		11.68			19.46		2.113		299.1		299.1			7.786		
PESO MOLECULAR (kg/kmol)		144.13			144.13		405.11		60.096		60.096			144.13		
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)		2.147			3.578		0.6847		22.90		22.90			1.431		
TEMPERATURA (°C)	45.0	180.0		180.0	146.2		20.0		30.0		30.0		30.0	120.0		146.2
PRESIÓN (atm)	1.40	0.66		0.66	0.66		1.00		1.00		1.30		1.30	1.18		0.66
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)		783.95			783.95		1250.0		785.0		785.0			1250.0		
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	-1.258E+07	-6.008E+06		-1.835E+08	-1.105E+07		-1.790E+04		-9.511E+07		-9.511E+07		940.1	-4.477E+06		-5.650E+05
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)	3.494E+03			5.097E+04									0.261			158.944
FASE	L	V		V	L-V		L		L		L		L	L		L
FRACCIÓN MASICA DE VAPOR	0.0	1.0		1.0	0.5862		0.0		0.0		0.0		0.0	0.0		0.0

BALANCE DE ENERGÍA								
COMPONENTES	CORRIENTES							
	32 (kg/h)	Fración (Xi)	RX-POLIM EQUIP-22	33 (kg/h)	Fración (Xi)	34 (kg/h)	Fración (Xi)	Q-DEC2 EQUIP-23
AGUA		0.0000	4987.9		0.0000		0.0000	
H2SO4		0.0000			0.0000		0.0000	
ACIDO LACTICO		0.0000	603.5		0.0000		0.0000	
CATALIZADOR OCTOATO DE ESTAÑO	855.9	0.0417		855.9	1.0000		0.0000	
INICIADOR ALCOHOL ISOPROPILICO		0.0000			0.0000		0.0000	
LACTIDA		0.0000			0.0000		0.0000	
PLA	19656.0	0.9589			0.0000	19656.0	1.0000	
TOTAL	20511.9	1.0000		855.9	1.0000	19656.0	1.0000	
FLUJO MOLAR (kmol/h)	1.026			2.113		0.9828		
PESO MOLECULAR (kg/kmol)	20000.0			405.11		20000.0		
CAUDAL VOLUMETRICO (m3/h)	16.41			0.6847		15.72		
TEMPERATURA (°C)	200.0		200.0	150.0		200.00		
PRESIÓN (atm)	2.00		2.00	1.00		1.00		200.00
DENSIDAD MÁSCA (kg/m3)	1250.0			1250.0		1250.0		1.00
FLUJO DE CALOR (KJ/h)	1.501E+07		1.165E+08	6.269E+05		1.438E+07		-9.700E+03
POTENCIA DEL EQUIPO (kW)			9.296E+04					1.028
FASE	L		L	L		L		L
FRACCIÓN MASICA DE VAPOR	0.0		0.0	0.0		0.0		0.0



## CAPÍTULO VI

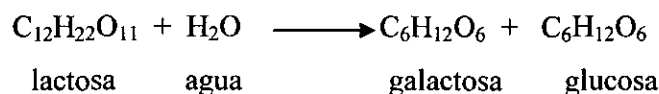
### SISTEMA DE REACCIÓN

En este capítulo se hace un análisis de la reacción química del proceso para la síntesis del biopolímero ácido poliláctico (PLA), su naturaleza química, la selección del catalizador para la polimerización, mecanismo de la reacción, las condiciones termodinámicas, parámetros y cinética de la reacción en el proceso en la obtención del ácido poliláctico (PLA).

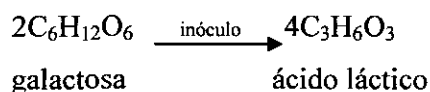
#### 6.1. REACCIONES QUÍMICAS

En el proceso para la producción del ácido poliláctico (PLA) implica las siguientes reacciones químicas que se realizan en los equipos principales como son: hidrólisis de lactosa, la reacción de fermentación anaeróbica para obtención del ácido láctico con inoculación del microorganismo *Lactobacillus Bulgaricus*, la reacción de neutralización para obtención del lactato de calcio con el regulador hidróxido de calcio, la reacción de acidulación con ácido sulfúrico para recuperar el ácido láctico, la reacción de prepolimerización para la obtención del monómero lactida y la reacción de polimerización por el método ROP con el catalizador octoato de estaño en conjunto con el iniciador alcohol isopropílico para obtención del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

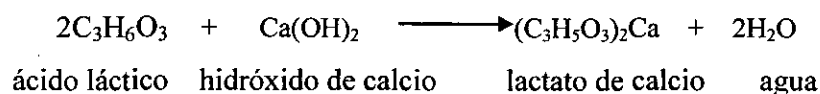
➤ Reacción hidrólisis de lactosa:



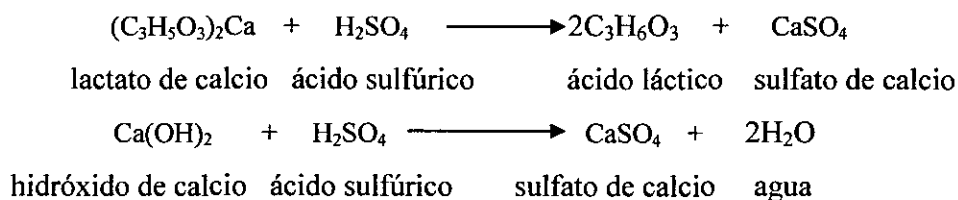
➤ Reacción de fermentación anaeróbica:



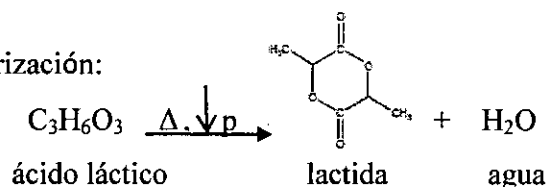
➤ Reacción de neutralización:



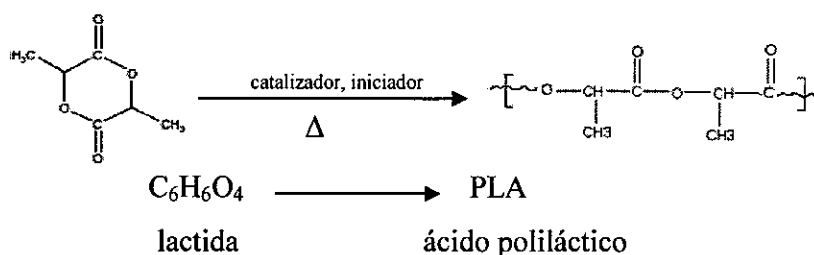
➤ Reacción de acidulación:



➤ Reacción de prepolimerización:



➤ Reacción de polimerización:

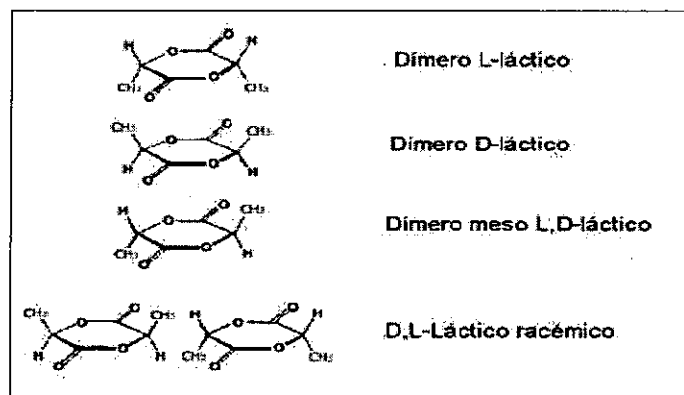


## 6.2. ISOMERISMO ÓPTICO Y ESTEREOQUÍMICA

El ácido poliláctico es una molécula quiral, existe en dos formas estereoisómeras que dan lugar a cuatro polímeros morfológicamente diferentes. (Ver Figura 21)

El isomerismo óptico del ácido láctico tiene una gran influencia sobre el metabolismo del monómero y las propiedades del polímero resultante. Este tipo de isomerismo resulta del hecho de que uno de los átomos de carbono (el centro asimétrico) tiene cuatro grupos unidos a él que no son idénticos y por lo tanto no son superponibles en su imagen especular. Tanto el ácido láctico  $D^{(-)}$  como el  $L^{(+)}$  son física y químicamente idénticos excepto en que cada uno rota en dirección opuesta, D dextrorrotación a la derecha y L levorrotación a la izquierda.

Figura 21. Estereoisomería del ácido láctico

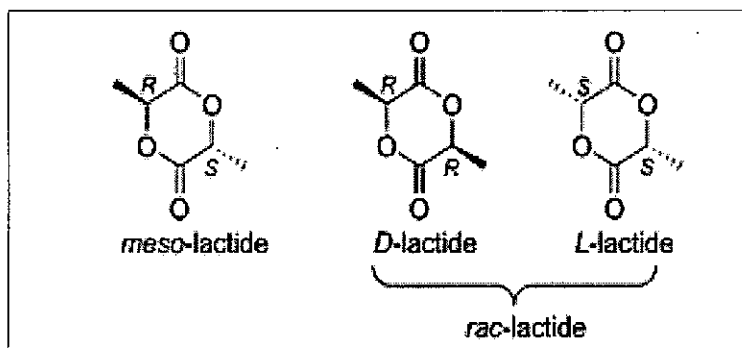


Fuente: Química Orgánica T.W.G. Solomons

La estereoquímica de las polilactidas y el control de sus centros quirales tienen un papel fundamental de sintetizar este tipo de compuestos. Dependiendo de la estereoquímica de sus centros quirales las polilactidas pueden tener distintas propiedades físicas. Si nos fijamos el monómero lactida utilizado en la síntesis de las polilactidas a través del mecanismo ROP podemos tener tres tipos de monómeros.

Por un lado la meso-lactida, en donde los dos grupos metilo están en orientaciones distintas. Esos centros quirales son R y S respectivamente. Por otro lado tenemos la L-lactida y D-lactida, que se denominan comúnmente rac-lactida. (Ver Figura 22)

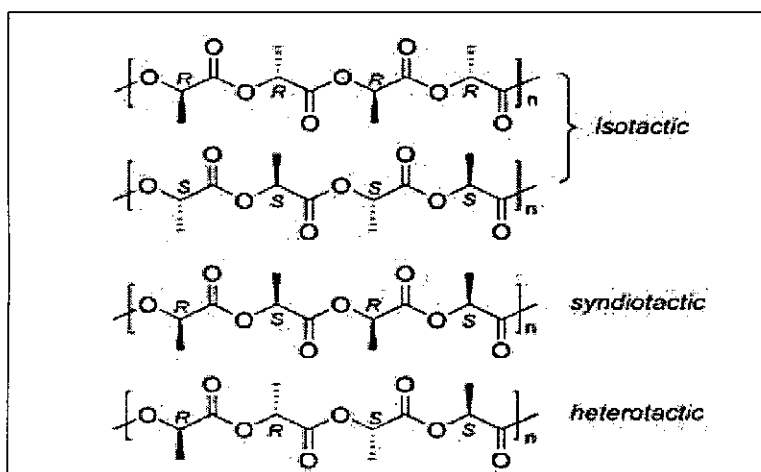
Figura 22. Tipos de monómero del dímero la lactida



Fuente: Química Orgánica T.W.G. Solomons

Estos monómeros se pueden obtener y usar de forma enantioméricamente pura para la síntesis de las polilactidas. Así podemos tener poliláctidas isotácticas, sindiotácticas y heterotácticas según la Figura 23.

Figura 23. Enantiómeros de monómero lactida



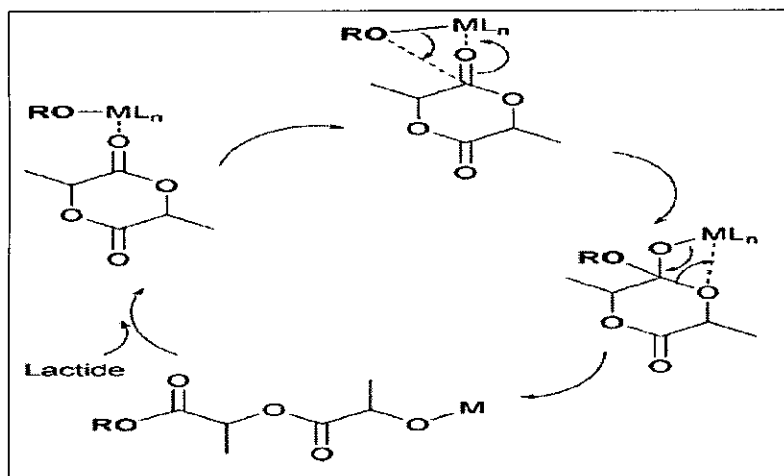
Fuente: <http://www.google.com.pe/estereoquimica>

### 6.3. MECANISMO DE LA REACCIÓN POLIMERIZACIÓN POR EL MÉTODO ROP

La polimerización por rompimiento de anillo (ROP) a partir del dímero cíclico lactida es el método más utilizado para la producción de poliésteres biodegradables. En la mayoría de los casos los iniciadores utilizados en el método por ROP son especies polares o iónicas con las que los monómeros puedan reaccionar, la cual para obtención del ácido poliláctico (PLA) se requerirá del alcohol isopropílico.

El mecanismo de coordinación-inserción comienza con la coordinación de la lactida al metal ácido de Lewis del complejo metal-alcóxido. El enlace acilo se rompe para dar la apertura del anillo y se genera una nueva especie metal-alcóxido a partir de la cual el ciclo puede reiniciarse según la Figura 24.

**Figura 24. Mecanismo de reacción por polimerización por el método ROP**



Fuente: Procesos catalíticos en la síntesis de polímeros biodegradables lactidas

Muchos metales han presentado precedentes para iniciar la polimerización por la vía coordinación-inserción. La característica común es poseer ácidos de Lewis con un metal-alcóxido. Estudios recientes muestran que un buen iniciador catalítico es el alcohol isopropílico, para el método ROP el dímero lactida y ésteres cíclicos requiere las siguientes condiciones:

- El metal debe ser inerte e inactivo.
- La plantilla inorgánica  $L_nM$  debe ser inerte.
- El ligando alcoxo en el complejo  $L_nMOR$  debe ser lábil al intercambio del alcohol y las reacciones de inserción con enlaces C-X múltiples.

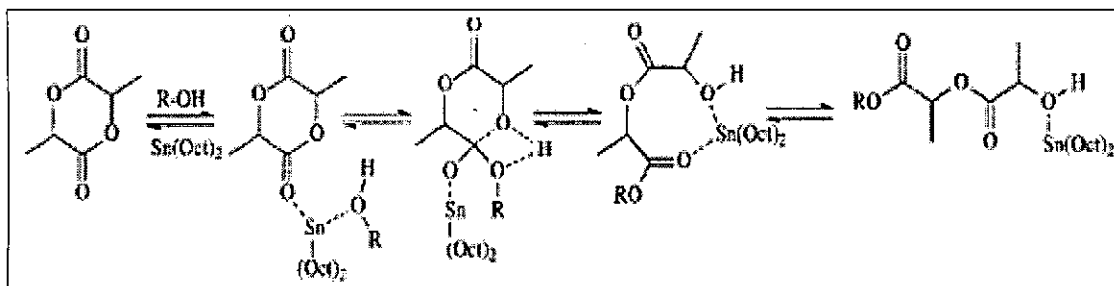
#### 6.4. SELECCIÓN DEL CATALIZADOR PARA LA POLIMERIZACIÓN

Se han evaluado muchos catalizadores para la polimerización del dímero lactida, incluyendo compuestos de metales de transición: lata, aluminio, plomo, zinc, bismuto, hierro e itrio; incluso bases fuertes tales como los alcóxidos. Dependiendo del sistema catalizador y de las condiciones de la reacción, estos tres mecanismos permiten explicar la cinética de la reacción de polimerización que pueden tener lugar: catiónico, aniónico y coordinación-inserción.

Los compuestos de estaño especialmente el ácido 2-etilhexanoato de estaño (octoato de estaño), es el preferido para la polimerización de la lactida debido a su solubilidad en la lactida fundida, alta actividad catalítica e índice bajo de la ramificación del polímero.

El uso del catalizador octoato de estaño en la polimerización resulta una conversión del 90% y menos de 1% de ramificación proporcionando polímeros de elevado peso molecular. La polimerización del dímero lactida usando el catalizador octoato de estaño y el iniciador alcohol isopropílico ocurre generalmente por vía del mecanismo coordinación-inserción, con la apertura del anillo de la lactida y polimerización a ambos lados de la cadena según la Figura 25.

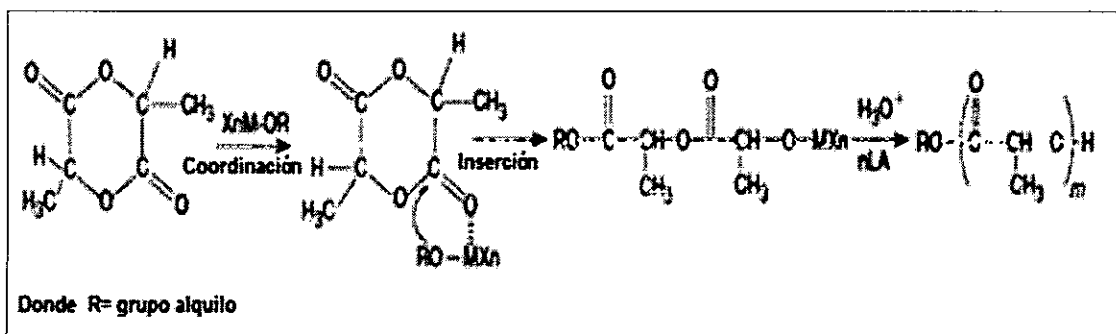
**Figura 25. Mecanismo de polimerización por vía coordinación-inserción**



Fuente: Polylactic acid (PLA) properties, market and perspectives

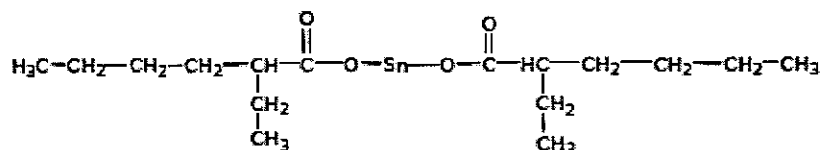
Esto se debe a su alta eficiencia catalítica, baja toxicidad y capacidad de obtención de altos pesos moleculares con baja ramificación. La Figura 26 muestra que el mecanismo global es del tipo de "coordinación-inserción", que ocurre en dos pasos: En primer lugar, se forma un complejo entre el monómero lactida y el catalizador, seguido de una reordenación de los enlaces covalentes, a continuación, el monómero se inserta dentro del enlace oxígeno-metal del iniciador, su estructura cíclica es abierta a través de la ruptura del enlace acilo-oxígeno, por lo tanto el metal se incorpora con un enlace alcóxido en la cadena de propagación. Se ha encontrado que el rendimiento de polimerización es afectado por diferentes parámetros; tales como la temperatura, tiempo de polimerización, proporción monómero/catalizador y el tipo de catalizador, también que la longitud de la cadena está controlada por la cantidad de impurezas.

**Figura 26. Mecanismo general de polimerización para obtención del PLA**



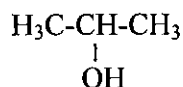
Fuente: Averous, L., Polylactic acid synthesis, properties and applications. Cap. 21, Pág. 433-450.

**Catalizador:** Octoato de estaño (2-etil hexanoato de estaño)



**Formula:** C<sub>16</sub>H<sub>30</sub>O<sub>4</sub>Sn

**Peso molecular catalizador:** 405.11 g/mol



**Iniciador:** Alcohol isopropílico (2-propanol)

**Peso molecular iniciador:** 60.096 g/mol

**Formula:** C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O

## 6.5. CINÉTICA DE REACCIÓN OBTENCIÓN DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

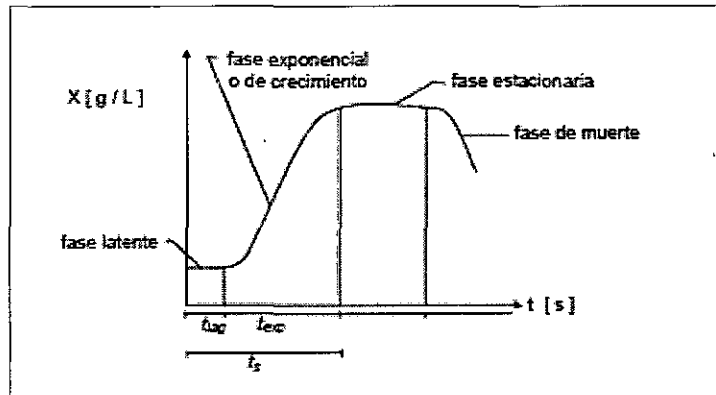
Se realizaron estudios cinéticos los cuales permitieron definir el proceso de producción y las condiciones de operación adecuada. A través de la cinética de reacción, parámetros como tiempo y avance de reacción fueron establecidos, incluye el desarrollo de los modelos cinéticos de las reacciones de fermentación, prepolimerización y polimerización.

### 6.5.1 Cinética de la reacción de fermentación

Durante la fermentación el sustrato se consume, los microorganismos crecen, se multiplican y el producto se forma. El proceso que transcurre dentro del fermentador es bastante complejo, ya que involucra procesos biocinéticos, de transferencia de masa, calor y fenómenos hidrodinámicos. Se ajustaron ecuaciones cinéticas propuestas para la producción de biomasa, el consumo de sustrato (lactosa) y formación de ácido láctico.

➤ **Fases del ciclo de crecimiento:** Cuando las células son inoculadas en el fermentador que contienen un medio de cultivo y su incremento en la concentración es monitoreado, se observan diferentes fases de su crecimiento. Hay una fase de retardo (latencia) inicial, la cual es de duración variable. Esta es seguida por la fase de crecimiento exponencial, donde el número de células se incrementa exponencialmente, conocida como la fase logarítmica. Posteriormente hay una corta fase de declinamiento en la fase de crecimiento y se establece la fase estacionaria, en donde el número de células es el mayor alcanzado durante el proceso. Finalmente el número de células decrece durante la fase de muerte. Estas fases son ilustradas en el Gráfico 16.

**Gráfico 16. Curva típica de crecimiento del microorganismo**



Fuente: BLANCH, Harvey and DOUGLAS. Biochemical Engineering. Editorial Marcel Dekker, 2000

Los primeros modelos para el crecimiento celular no tienen en cuenta la dependencia de la velocidad de crecimiento exponencial con la concentración de nutrientes. El modelo más simplificado es el Malthus descrito como:

$$r_x = \mu X \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $r_x$  es la velocidad volumétrica de incremento celular

Se propuso el modelo de un término inhibitor el cual es dependiente de la concentración celular:

$$r_x = kX(1 - \beta X) \quad (\text{Ec. 2})$$

➤ **Producción de biomasa:** Uno de los modelos simplificados que incluye el efecto de la concentración de nutrientes es el modelo de Monod. Este modelo asume que sólo un sustrato (el sustrato limitante de la velocidad del crecimiento,  $S$ ) es relevante en la determinación de la velocidad de proliferación del microorganismo *Lactobacillus Bulgaricus*. La forma de la ecuación de Monod es similar a la cinética enzimática de Michaelis-Menten:

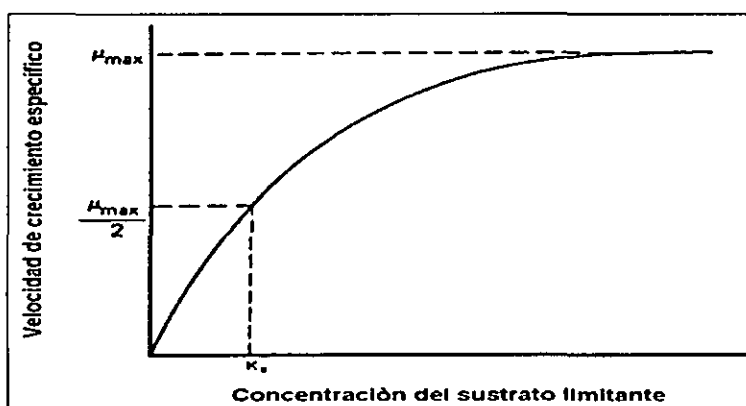
$$\mu_x = \frac{\mu_{\max} S}{k_s + S} \quad (\text{Ec. 3})$$

Así para un crecimiento a un volumen constante:

Donde  $\mu_{\max}$  es la velocidad específica máxima de crecimiento de las células y  $K_s$  la constante del sustrato, que es el valor de la concentración de nutriente cuando la velocidad de crecimiento específica está a la mitad de su máximo valor.

Esta ecuación presenta dos formas de limitante. A concentraciones altas de lactosa,  $S \gg K_s$  y la ecuación anterior se reduce a una ecuación con dependencia de orden cero en relación a la concentración de sustrato (lactosa). A concentraciones bajas,  $S \ll K_s$  lo que resulta en una dependencia de primer orden. Los resultados típicos de la dependencia de la velocidad específica de crecimiento con la concentración de sustrato son representados en el Gráfico 17.

Gráfico 17. Influencia de concentración del sustrato



Fuente: BLANCH BROCK Thomas. Biology of Microorganisms, 7th edition. Pág 367-368

Los valores de  $\mu_{\max}$  es respecto al microorganismo *Lactobacillus Bulgaricus* y el valor de  $K_s$  depende de la naturaleza del sustrato.

La Tabla 18 resume los parámetros cinéticos de los valores de  $\mu_{\max}$  y  $K_s$  usando el *Lactobacillus Bulgaricus* como microorganismo:

Tabla 18. Parámetros cinéticos a 48°C y pH 5.7 usando *Lactobacillus Bulgaricus*

Sustrato	Velocidad de crecimiento específico ( $\text{h}^{-1}$ )	Rendimiento de crecimiento (g cel / g sustrato)	Tiempo de residencia (h)
Lactosa	0.98	0.097	7.5
Glucosa	0.96	0.093	8.0
Galactosa	0.76	0.081	9.5

Fuente: BURGOS-RUBIO "Kinetic study of the Conversion to Lactic Acid Using *Lactobacillus bulgaricus*". Pág 305 – 314

➤ **Consumo de sustrato:** Las células consumen sustrato del medio ambiente y lo canalizan en diferentes rutas metabólicas. La velocidad específica de consumo de sustrato para actividades de mantenimiento se conoce como el coeficiente de mantenimiento  $m_s$ , el modelo en los que el producto está asociado con el crecimiento microbiano, las velocidades de consumo de sustrato, crecimiento celular y mantenimiento se relacionan de la siguiente manera:

$$r_s = \frac{dS}{dt} = - \frac{1}{Y_{XS}} \frac{dX}{dt} + m_s X \quad (\text{Ec. 4})$$

En la ecuación  $Y_{XS}$  es el rendimiento de sustrato en biomasa.

Generalmente, cuando el sustrato (lactosa) es el factor limitante del crecimiento, la cantidad de biomasa producida es proporcional a la cantidad de fuente de carbono consumida y el rendimiento del sustrato puede definirse de la siguiente manera:



$$Y_{x/s} = \frac{\Delta X}{\Delta S} = \frac{X-X_0}{S-S_0} \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo  $X_0$  y  $S_0$  las concentraciones iniciales de biomasa y sustrato, respectivamente.

➤ **Formación de ácido láctico:** De acuerdo con la relación cuantitativa entre la cantidad de producto y el crecimiento de biomasa puede darse el caso que la formación de producto esté directamente asociada con el crecimiento. Algunas de las ecuaciones que describen la formación de ácido láctico son:

$$r_p = \frac{dP}{dt} = Y_{p/x} \frac{dX}{dt} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$r_p = Y_{p/s} \frac{dS}{dt} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde  $Y_{p/s}$  es el rendimiento de sustrato en producto y  $Y_{p/x}$  es el rendimiento de biomasa en producto, los cuales se definen como:

$$Y_{p/s} = \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{P-P_0}{S-S_0} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$Y_{p/x} = \frac{\Delta P}{\Delta X} = \frac{P-P_0}{X-X_0} \quad (\text{Ec. 9})$$

Siendo  $P_0$  la concentración inicial del producto.

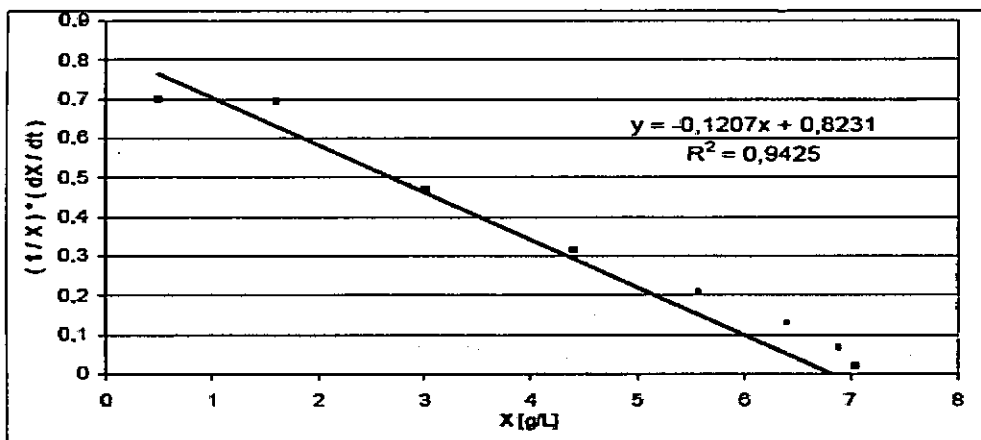
Los parámetros cinéticos en la reacción de fermentación se presentan en la Tabla 19, donde se determinan las constantes  $Y_{x/s}$ ,  $Y_{p/s}$ ,  $\beta$ ,  $k$  y  $m_s$ .

**Tabla 19. Parámetros cinéticos en la fermentación**

Variables de respuesta del modelo	Valor	Unidades
$Y_{x/s}$	0.0927	g biomasa / g sustrato
$Y_{p/s}$	0.9021	g producto / g sustrato
$B$	- 0.1207	g biomasa <sup>-1</sup>
$K$	0.8231	h <sup>-1</sup>
$m_s$	0.14	g sustrato/g biomasa*h

Para hallar el valor de los coeficientes de la ecuación logística se empleó el procedimiento utilizado por Klasson,  $k$  y  $\beta$  se toman como el término independiente y la pendiente respectivamente de la línea recta resultante del linealización; para obtener los valores de esta recta fue necesario hallar los incrementos de biomasa ( $dX$ ), incremento de tiempo constante ( $dt$ ) utilizando la curva ajustada en el programa Excel 2010. La recta obtenida al graficar  $(1/X)*(dX/dt)$  Vs.  $X$  es mostrada en el Gráfico 18.

**Gráfico 18. Determinación de los parámetros en la cinética de fermentación**

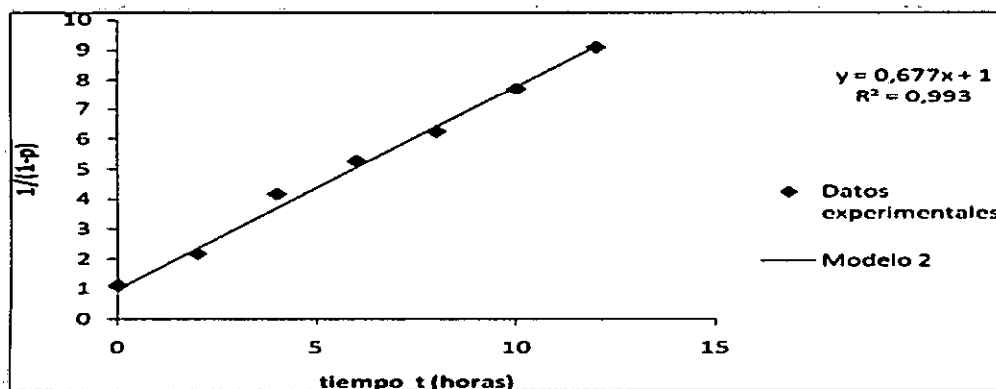


Fuente: KLASSON "Continuous fermentation for the production of acid lactic from lactose". Vol. 20, 1994

### 6.5.2 Cinética de la reacción de prepolimerización

La cinética de reacción de prepolimerización para obtención del dímero lactida está basado en modelo experimental de Pinzón J., es de segundo orden dado que  $1/(1-p)$  y  $t$  tienen una relación lineal según la Gráfico 19.

**Gráfico 19. Ajuste lineal del modelo cinético de prepolimerización**



Fuente: Elaboración propia

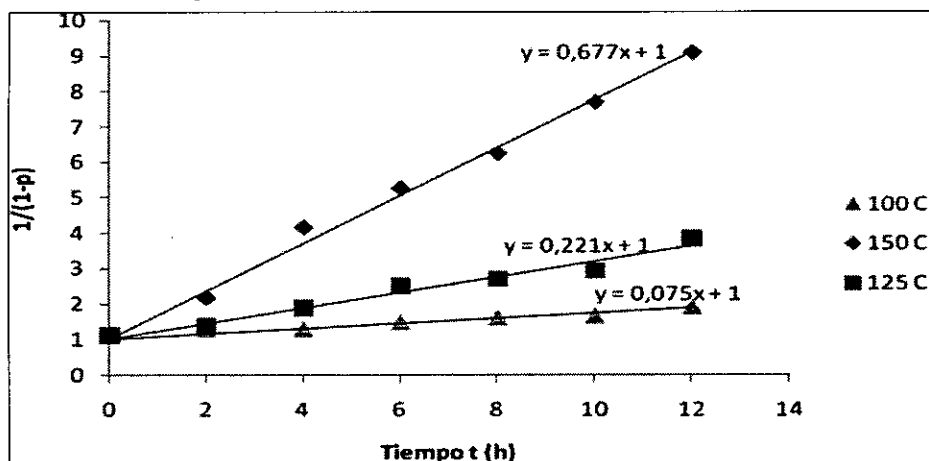
Para determinar la energía de activación  $E_a$  del modelo cinético, se graficó  $1/(1-p)$  contra  $t$  a 100°C, 125 °C y 150°C en el Gráfico 20. A partir de las pendientes de las rectas de esta figura y del valor de la concentración inicial, se calculó  $k'$  a las temperaturas evaluadas según la Tabla 20.

**Tabla 20. Constantes de velocidad de reacción de prepolimerización**

Temperatura (°C)	$K'$ (L/mol*h)
100	0.00673
125	0.01982
150	0.06072

Fuente: Elaboración propia

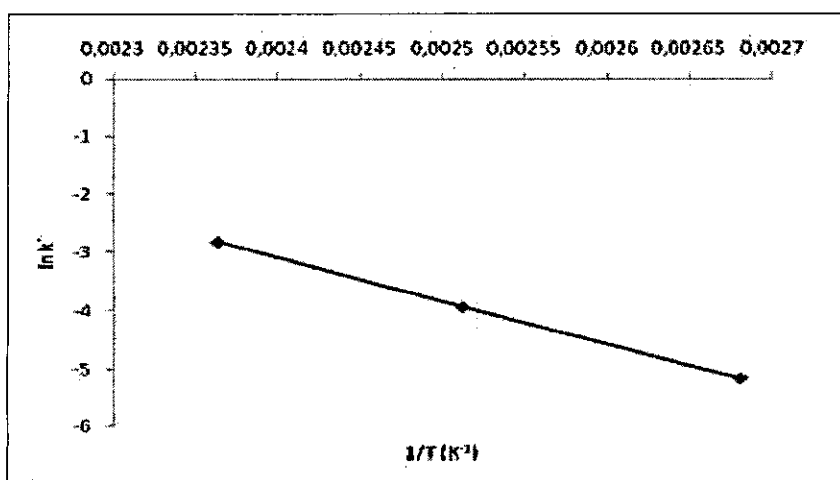
Gráfico 20. Ajuste lineal del modelo Pinzón a diferentes temperaturas



Fuente: Estudio cinético de oligomerización Revista Colombiana de Química 2010, Volumen 35, Pág. 125-134

Los valores de la Tabla 18 se emplearon para determinar la dependencia de la constante de velocidad de reacción con la temperatura, la pendiente de la recta del Gráfico 21, se obtuvo la energía de activación  $E_a$ , cuyo valor es de 57.615 KJ/mol.

Gráfico 21. Dependencia de la velocidad de reacción con la temperatura



Fuente: Elaboración propia

La constante de velocidad de reacción, a la temperatura de operación 180°C, se calculó con la ecuación de Arrhenius:

$$k_2 = k_1 * e^{\frac{E_a}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]} \quad (\text{Ec. 10})$$

k: constante de velocidad a la temperatura T, L/mol\*h

A: factor pre-exponencial

$E_a$ : Energía de activación, J/mol

R: Constante de los gases ideales, 8,3143 J/mol\*K

$k_1$ : constante de velocidad a  $T_1$

$k_2$ : constante de velocidad a  $T_2$

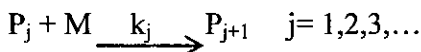
La constante de velocidad a una temperatura de reacción 180°C es de  $k_2 = 0.1895$  L/mol\*h.

### 6.5.3 Cinética de la reacción de polimerización

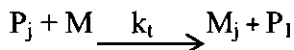
En la polimerización por apertura de anillo del dímero lactida, el resultado de la iniciación es la apertura del anillo para formar un iniciador secundario  $P_1$ . Esto puede ser generalizado como:



Donde  $M$  es el monómero,  $I$  es el iniciador/catalizador y  $P_1$  es el polímero activado de una unidad. La iniciación se caracteriza por una tasa constante  $k_0$ . El iniciador crece por adiciones sucesivas de apertura de anillo de monómero:



Donde  $P_j$  es la cadena de polímero activada de  $j$  unidades. La constante de velocidad  $k_j$  se refiere al  $j$ -simo paso de propagación en una cadena. La naturaleza del proceso de crecimiento de la cadena en la polimerización por apertura del anillo (ROP) tiene un parecido superficial con la polimerización en cadena. El crecimiento de la cadena polimérica continúa hasta su terminación o hasta que el monómero es consumido en su totalidad. El mecanismo de terminación que se muestra a continuación es el de transferencia de cadena al monómero:



En la anterior reacción, se supone que el anillo cargado de manera espontánea forma  $P_1$ . Aquí  $M_j$  es el polímero desactivado de  $j$  unidades repetitivas, que no participarán en ninguna reacción. La velocidad de polimerización  $R_p$  puede ser expresada en términos de la concentración del monómero  $[M]$  y del iniciador  $[I]$ . Si se asume que la constante de velocidad  $k$  es igual para todo largo de cadena y que la reacción es irreversible, entonces:

$$R_p = -\frac{d[M]}{dt} = k[I]^\beta [M]^\alpha \quad (\text{Ec. 11})$$

$$R_p = -\frac{d[M]}{dt} = k'[M]^\alpha \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde  $k' = k[I]^\beta$

$k'$ : constante de velocidad aparente,  $\text{h}^{-1}$  para reacción de primer orden

$\alpha$ : orden de reacción

➤ **Método integral para determinar el orden de reacción:** En el caso de una reacción de primer orden, la combinación de la ley de velocidad y el balance de moles da como resultado:

$$-\frac{d[M]}{dt} = k'[M] \quad (\text{Ec. 13})$$

La integración de la Ec. 13, donde  $[M_0]$  es la concentración del monómero en  $t=0$ , se obtiene:

$$\ln \frac{[M_0]}{[M]} = k't \quad (\text{Ec. 14})$$

La concentración  $[M]$  en el tiempo  $t$  está dada por:

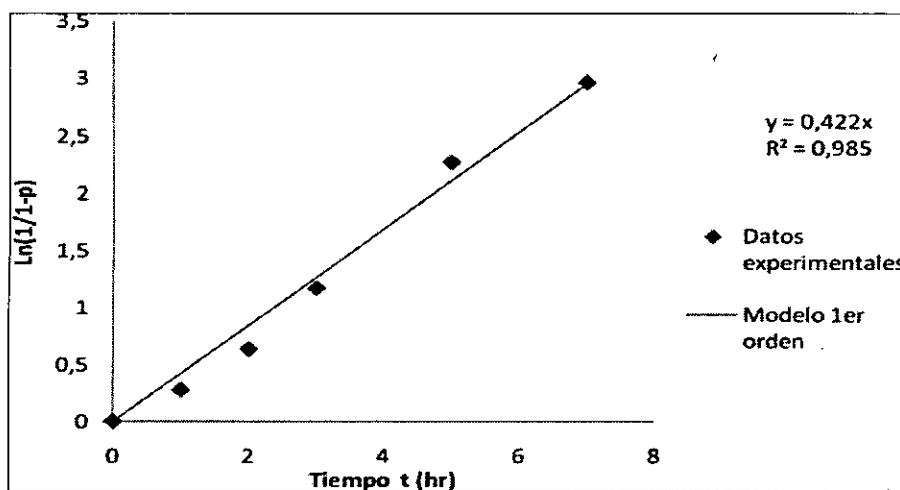
$$[M] = [M_0] (1 - p) \quad (\text{Ec. 15})$$

Al reemplazar la Ec. 14 en la Ec. 14 y organizar la ecuación:

$$\ln \frac{1}{1 - p} = k't \quad (\text{Modelo 1}^{\text{er}} \text{ orden}) \quad (\text{Ec. 16})$$

La reacción de polimerización por rompimiento de anillo (ROP) del dímero lactida se realiza a temperatura  $150^\circ\text{C}$ , con el catalizador octoato de estaño a una concentración de 5% en peso y el alcohol isopropílico como iniciador a 10% en peso con respecto a la alimentación. En el Gráfico 22 se encuentran los datos cinéticos estos muestran el avance de la reacción en función del tiempo, se graficó  $\ln(1/1 - p)$  contra  $t$ , para evaluar el modelo cinético de potencia de primer orden y se encontró los datos cinéticos que se ajustan de forma satisfactoria al modelo lineal. Con la pendiente se pudo determinar la constante de velocidad aparente de la reacción  $k' = 0,4228 \text{ hr}^{-1}$ .

**Gráfico 22. Modelo de primer orden reacción polimerización**



Fuente: Hyon S. (2007): "Synthesis of polylactides with different molecular weights". Pág. 1503-1508.

## 6.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN

En la etapa de fermentación se realiza a temperatura constante de  $48^\circ\text{C}$  por un tiempo de 48 horas, en el reactor de acidulación la temperatura es de  $25^\circ\text{C}$ , luego en la etapa de prepolimerización se realiza a  $180^\circ\text{C}$ ; porque a una temperatura mayor se presentaría un aumento en la evaporación del dímero lactida, mientras que, a una temperatura menor, se disminuiría la conversión. La temperatura de operación del reactor de polimerización es de  $150^\circ\text{C}$ , puesto que, se obtiene un polímero de alto peso molecular y una buena conversión.

## **CAPÍTULO VII**


### **DISEÑO DE EQUIPOS PRINCIPALES Y AUXILIARES DEL PROCESO**

En el presente capítulo se detallan las características de operación, función y especificaciones técnicas de los equipos principales y auxiliares del proceso para obtención del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.

Para ello se han tenido en cuenta las propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los componentes químicos.

El diseño de los equipos principales y auxiliares se calculará en base al código ASME (American Society of Mechanical Engineers), sección VIII, división 1, en el que se detalla el diseño, construcción y los parámetros requeridos.

Los cálculos para determinar el diseño de los equipos se encuentran en los anexos respectivos. A continuación se detalla las hojas de diseño técnico correspondientes a los equipos utilizados en el proceso.

	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-01	Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú	Hoja: 1	De: 2

#### DATOS GENERALES

Designación: Tanque de almacenamiento materia prima lactosuero

Orientación: Vertical	Cantidad: 3	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1038.1
Volumen (m <sup>3</sup> )	691	Peso equipo vacío (kg)	13104.8
Altura (m)	7.6	Peso equipo en operación (kg)	12338.6
Diámetro (m)	15.2	Fracción llenado típica	0.80


#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Medio	Lactosuero
Materia de construcción	Acero inoxidable austenítico ASTM A 240–304L
Temperatura de operación (°C)	25.0
Temperatura de diseño (°C)	29.3
Presión de trabajo (atm)	1.00
Presión de diseño (atm)	1.91
Corrosión superior (mm)	5.64
Corrosión inferior (mm)	5.64
Corrosión (mm)	8.13/ Cilíndrico

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Materia de Construcción: Acero inoxidable austenítico ASTM A 240–304L				
Forma: Hemisférico/Hemisférico				
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	2	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	3	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	3	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	3	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
E	3	Ventosa		

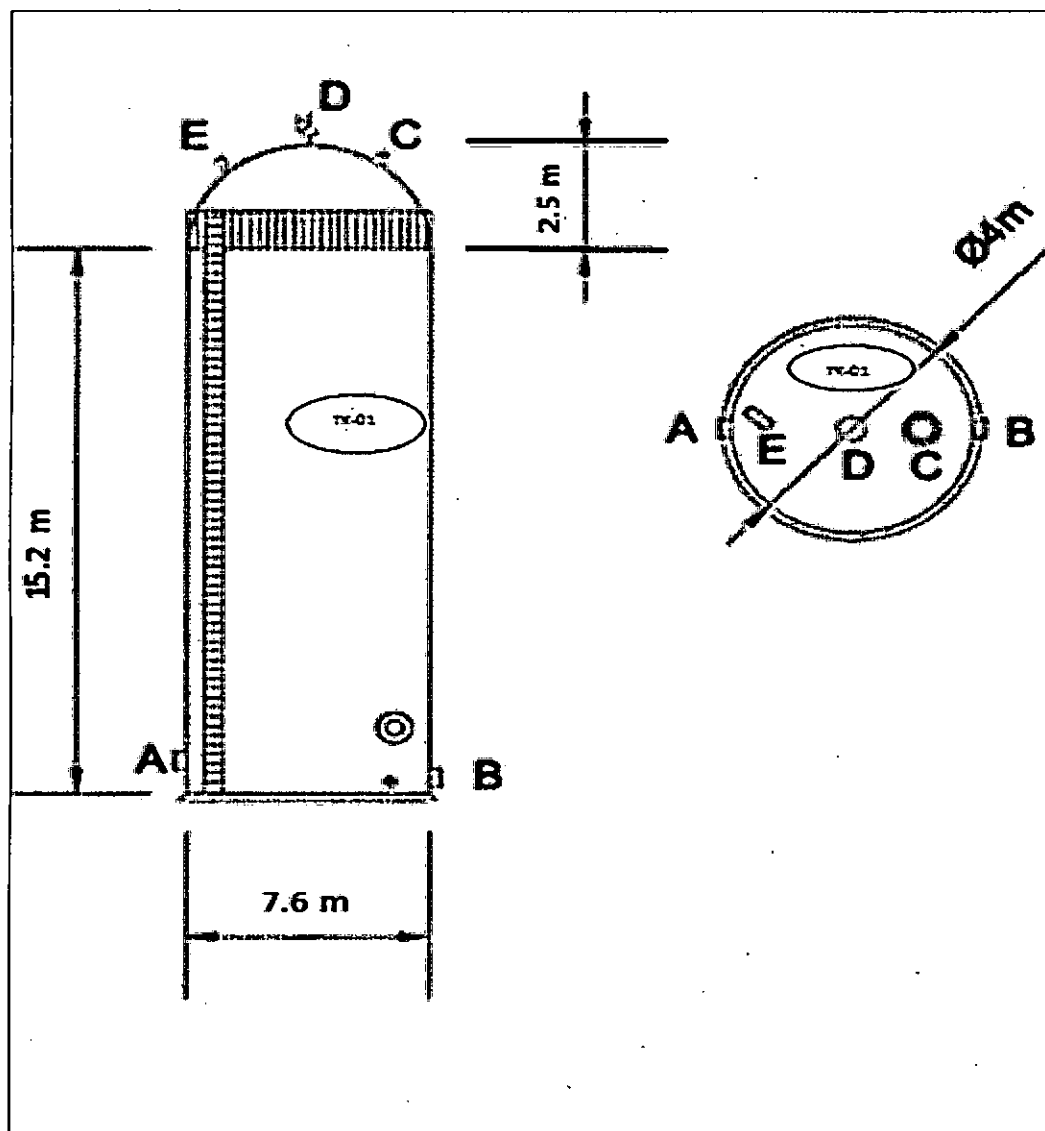


	TANQUE ALMACENAMIENTO	Ítem N°: TK-02		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 2	De: 2	Agosto


#### DATOS GENERALES

Designación: Tanque de almacenamiento materia prima lactosuero

Unidades: SI (m)





	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	<b>Ítem N°: TK-02</b>		<b>Área</b>
		<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>	<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>		<b>Fecha</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>	<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>	<b>Año</b>

#### DATOS GENERALES

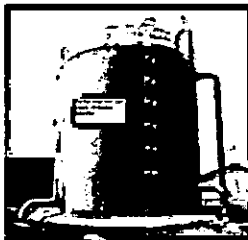
Designación: Tanque de almacenamiento de agua : Desmineralización en la operación ultrafiltración-diafiltración, disolvente en el proceso, también en el uso de refrigerante


Orientación: Vertical	Cantidad: 6	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1000.0
Volumen (m <sup>3</sup> )	1450	Peso equipo vacío (kg)	20624.4
Altura (m)	9.7	Peso equipo en operación (kg)	21905.1
Diámetro (m)	19.4	Fracción llenado típica	0.80

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Producto:	Agua para desmineralización, disolvente en el proceso y refrigerante		
Material de construcción	Acero inoxidable tipo 316		
Temperatura de operación (°C)	30.0		
Temperatura de diseño (°C)	35.2		
Presión de trabajo (atm)	1.00		
Presión de diseño (atm)	1.97		
Corrosión superior (mm)	5.64		
Corrosión inferior (mm)	5.64		
Corrosión externa (mm)	8.13/ Cilíndrico		

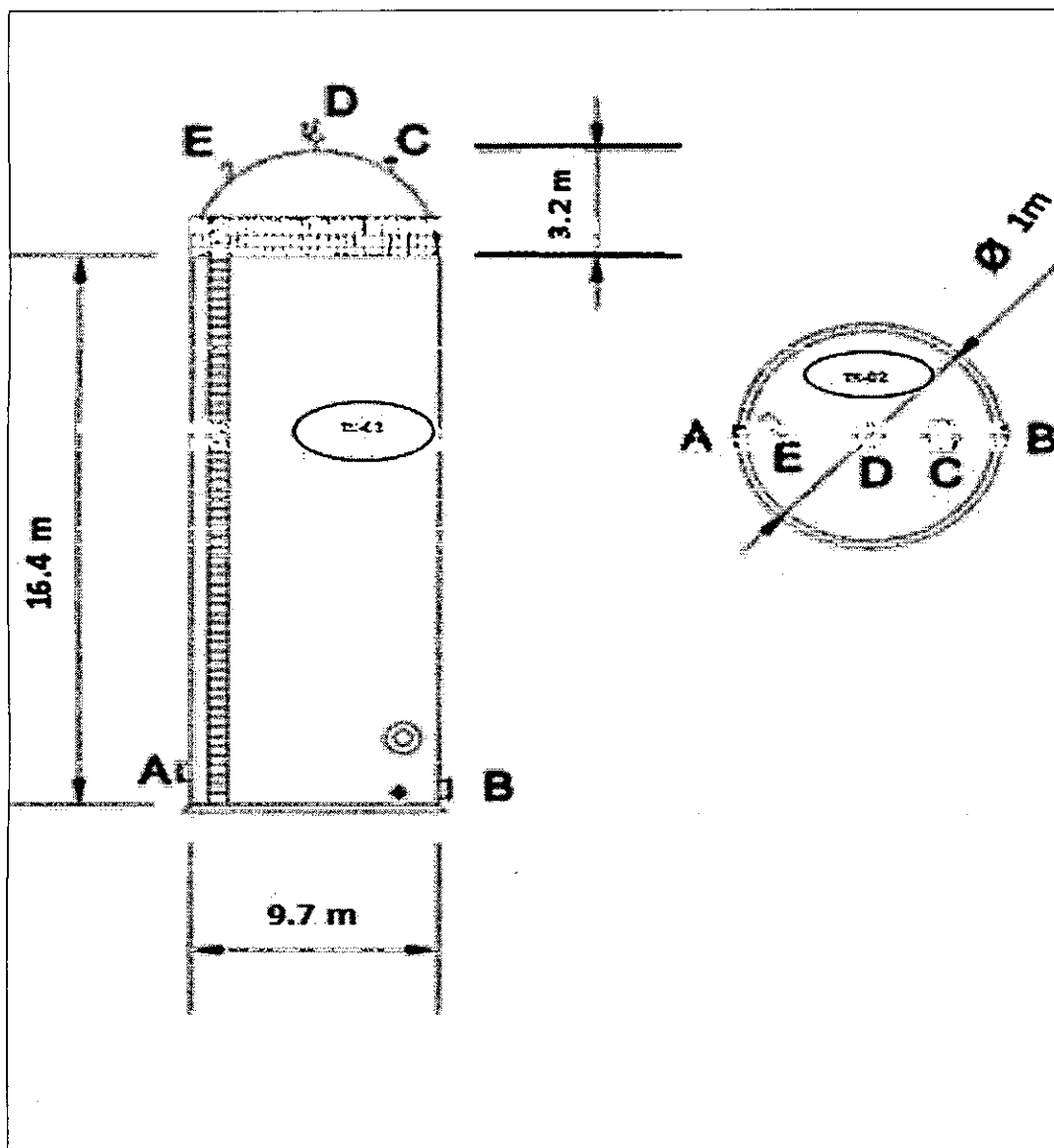
#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

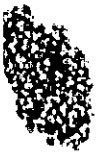
Material de Construcción: Acero inoxidable tipo 316				
Forma: Hemiesférico/Hemiesférico				
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/2	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	1	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	1	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
E	1/2	Venteo		
				

	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-02		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 2	De: 2	Ago-

**Designación:** Tanque de almacenamiento de agua : Desmineralización en la operación ultrafiltración-diafiltración, disolvente en el proceso, también en el uso de refrigerante

**Unidades:** SI (m)



	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	<b>Ítem N°: TK-03</b>		<b>Área</b>
		<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

Designación: Tanque de almacenamiento inóculo (Lactobacillus Bulgaricus)


Orientación: Vertical	<b>Cantidad: 1</b>	<b>Densidad del fluido (kg/m³)</b>	1181.0
Volumen (m³)	4.26	<b>Peso equipo vacío (kg)</b>	2800.0
Altura (m)	1.4	<b>Peso equipo en operación (kg)</b>	2978.0
Diámetro (m)	2.8	<b>Fracción llenado típica</b>	0.80


#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Producto:	Tanque de almacenamiento inóculo microorganismo Lactobacillus Bulgaricus		
Materiales de construcción	AISI 316-L		
Temperatura de operación (°C)	15.0		
Temperatura de diseño (°C)	18.2		
Presión de trabajo (atm)	0.32		
Presión de diseño (atm)	0.38		
Corrosión superior (mm)	1.0		
Corrosión inferior (mm)	1.0		
Forma (mm)	1.43/ Cilíndrico		

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

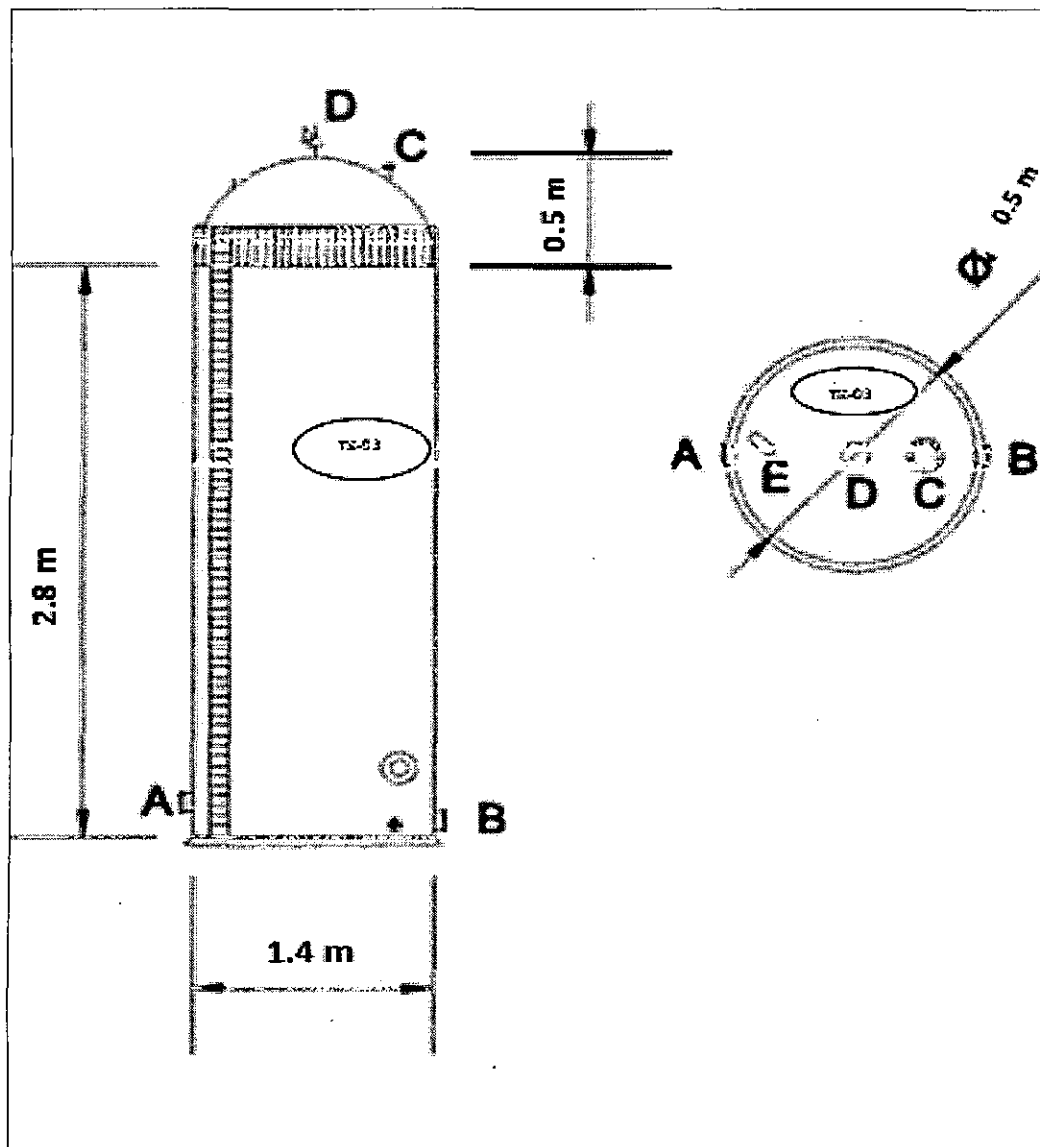
Materiales de Construcción: AISI 316-L	
Formas: Torisférico / Torisférico	


RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/4	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1/4	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	3/8	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	3/8	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
				

	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>		<b>Ítem N°:</b> TK-03	<b>Área</b>
	<b>Planta Química:</b> Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		<b>Proyecto:</b> Tesis para Título de Ingeniero Químico	<b>Proceso</b>
	<b>Ubicación de Planta:</b> Cajamarca - Perú		<b>Preparado por:</b> Br. Karina M. Yamunaque Chero	<b>Fechas</b>
			<b>Hoja:</b> 2	<b>De:</b> 2

**Designación:** Tanque de almacenamiento inóculo (*Lactobacillus Bulgaricus*)

**Unidades:** SI (m)



	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-04		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Página


#### DATOS GENERALES


Descripción: Tanque de almacenamiento de Hidróxido de calcio: Lechada de cal			
Orientación: Vertical	Cantidad: 1	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	2211.0
Volumen (m <sup>3</sup> )	31	Peso equipo vacío (kg)	1174.9
Altura (m)	2.7	Peso equipo en operación (kg)	1626.1
Diámetro (m)	5.4	Fracción llenado típica	0.80

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Medio: Líquido	Hidróxido de calcio		
Materia de construcción:	AISI 304		
Temperatura de operación (°C)	30.0		
Temperatura de diseño (°C)	35.2		
Presión de trabajo (atm)	1.04		
Presión de diseño (atm)	1.22		
Corrosión superior (mm)	4.01		
Corrosión inferior (mm)	4.01		
Forma (mm)	4.98/ Cilíndrico		

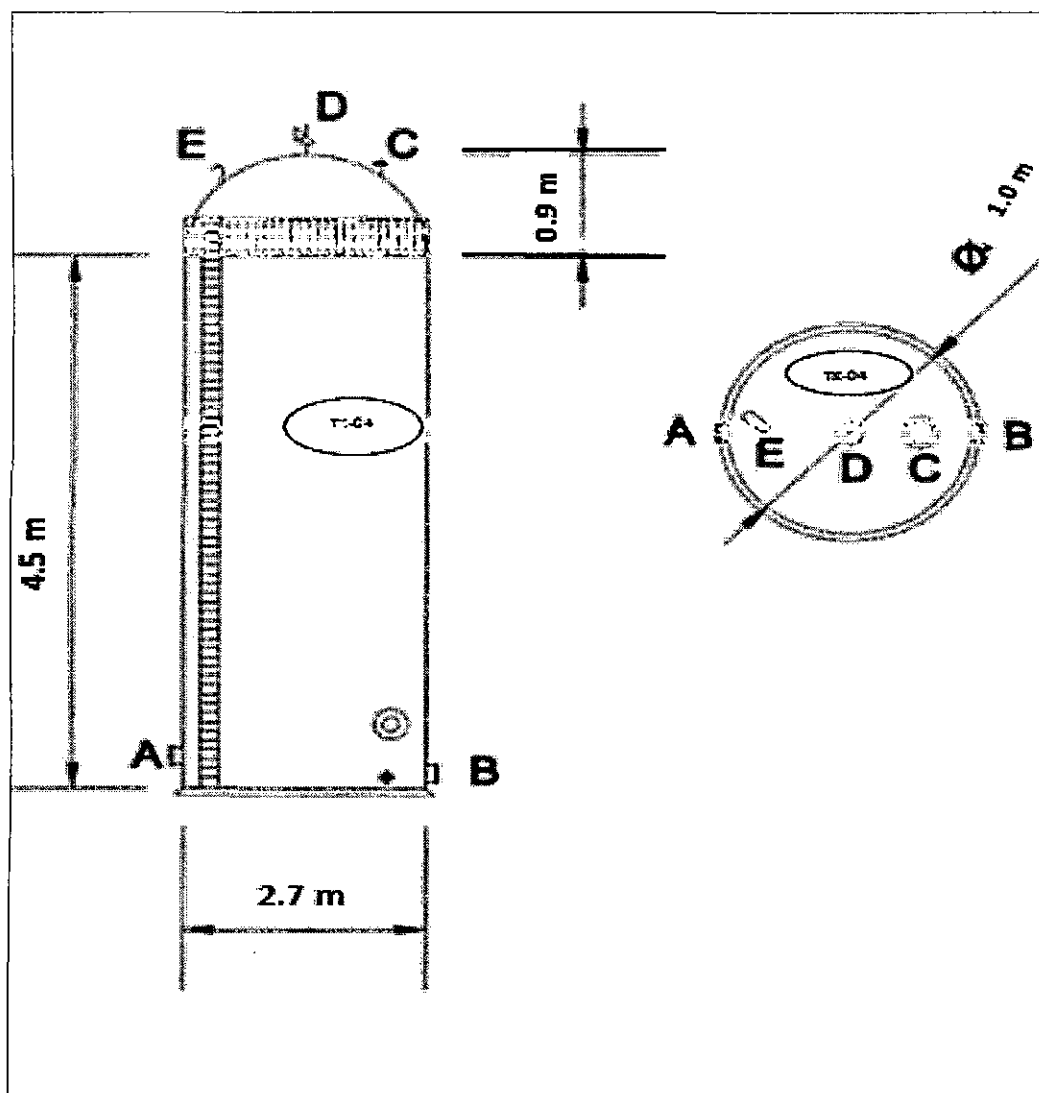
#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR


Material de Construcción: Acero inoxidable tipo 316				
Forma: Hemiesférico/Hemiesférico				
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/4	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1/2	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	1	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	1	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
E	1/4	Venteo		
				

	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-04	Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 2	De: 2

Designación: Tanque de almacenamiento de lechada de cal: Hidróxido de calcio

Unidades: SI (m)



	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-05		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Página

#### DATOS GENERALES

Denominación: Tanque de almacenamiento ácido sulfúrico pureza 98%

Orientación: Vertical	Cantidad: 2	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1850.0
Volumen (m <sup>3</sup> )	62	Peso equipo vacío (kg)	17112.5
Altura (m)	3.4	Peso equipo en operación (kg)	22816.7
Diámetro (m)	6.8	Fracción llenado típica	0.80

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Medio: Líquido	Ácido sulfúrico
Materia de construcción	Acero inoxidable austenítico ASTM A 240-304 L
Temperatura de operación (°C)	15.0
Temperatura de diseño (°C)	19.0
Presión de trabajo (atm)	1.04
Presión de diseño (atm)	1.30
Corrosión superior (mm)	4.38
Corrosión inferior (mm)	4.38
Corrosión lateral (mm)	5.59/ Cilíndrico

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Materia de Construcción: Acero inoxidable AISI 316	
Forma: Hemisférico/Hemisférico	

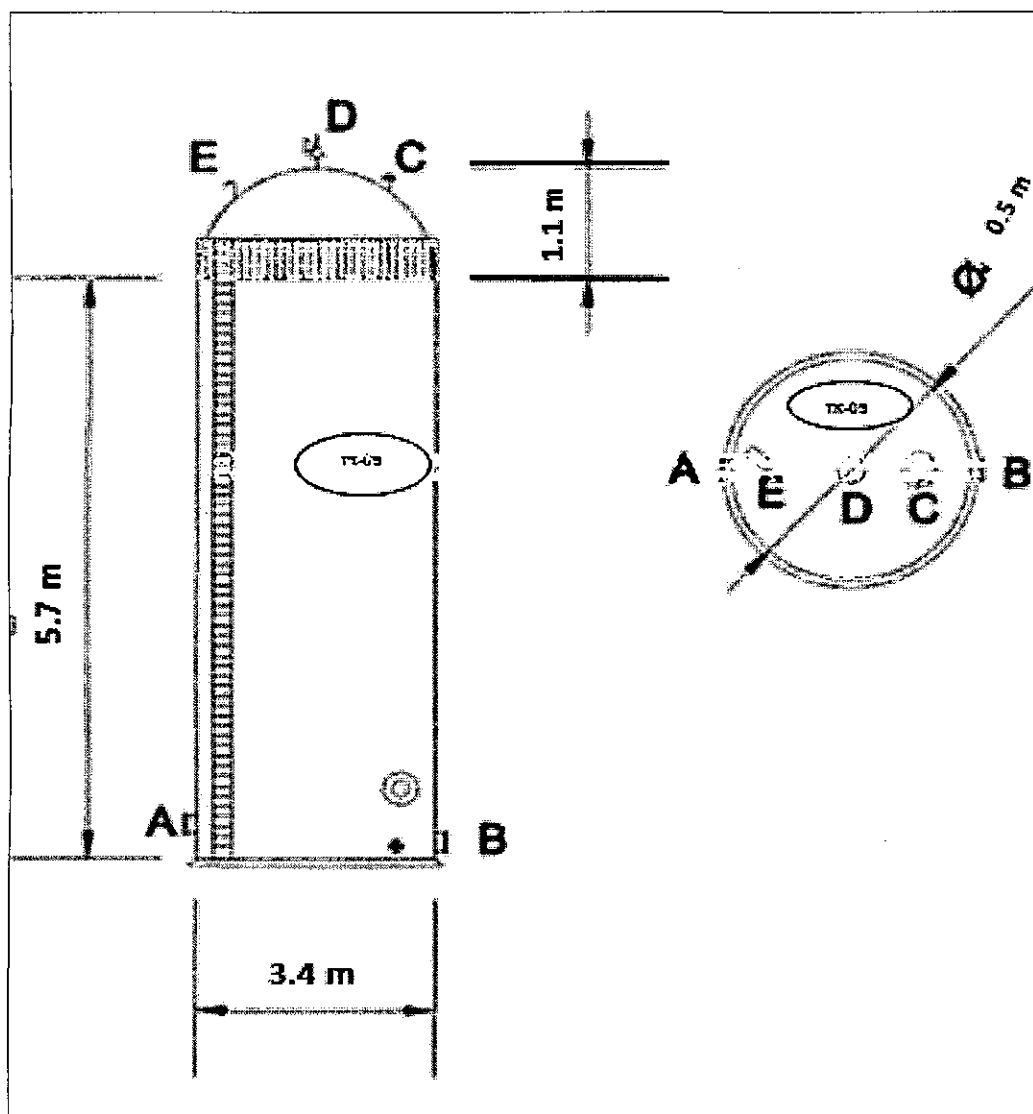
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/4	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	1/2	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	1/2	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
E	1	Ventoso		




	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-05		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 2	De: 2	Área

Designación: Tanque de almacenamiento ácido sulfúrico

Unidades: SI (m)





	TANQUE ALMACENAMIENTO	Ítem N°: TK-06		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Año

#### DATOS GENERALES


Designación: Tanque de almacenamiento del iniciador alcohol isopropílico


Orientación: Vertical	Cantidad: 1	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	785.0
Volumen (m <sup>3</sup> )	550	Peso equipo vacío (kg)	9525.1
Altura (m)	7.05	Peso equipo en operación (kg)	11700.1
Diámetro (m)	14.10	Fracción llenado típica	0.80

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Producto:	Alcohol isopropílico
Materiales de construcción:	AISI 304
Temperatura de operación (°C)	25.0
Temperatura de diseño (°C)	30.0
Presión de trabajo (atm)	1.00
Presión de diseño (atm)	1.20
Corrosión superior (mm)	8.18
Corrosión inferior (mm)	8.18
Corrosión externa (mm)	4.83/ Cilíndrico

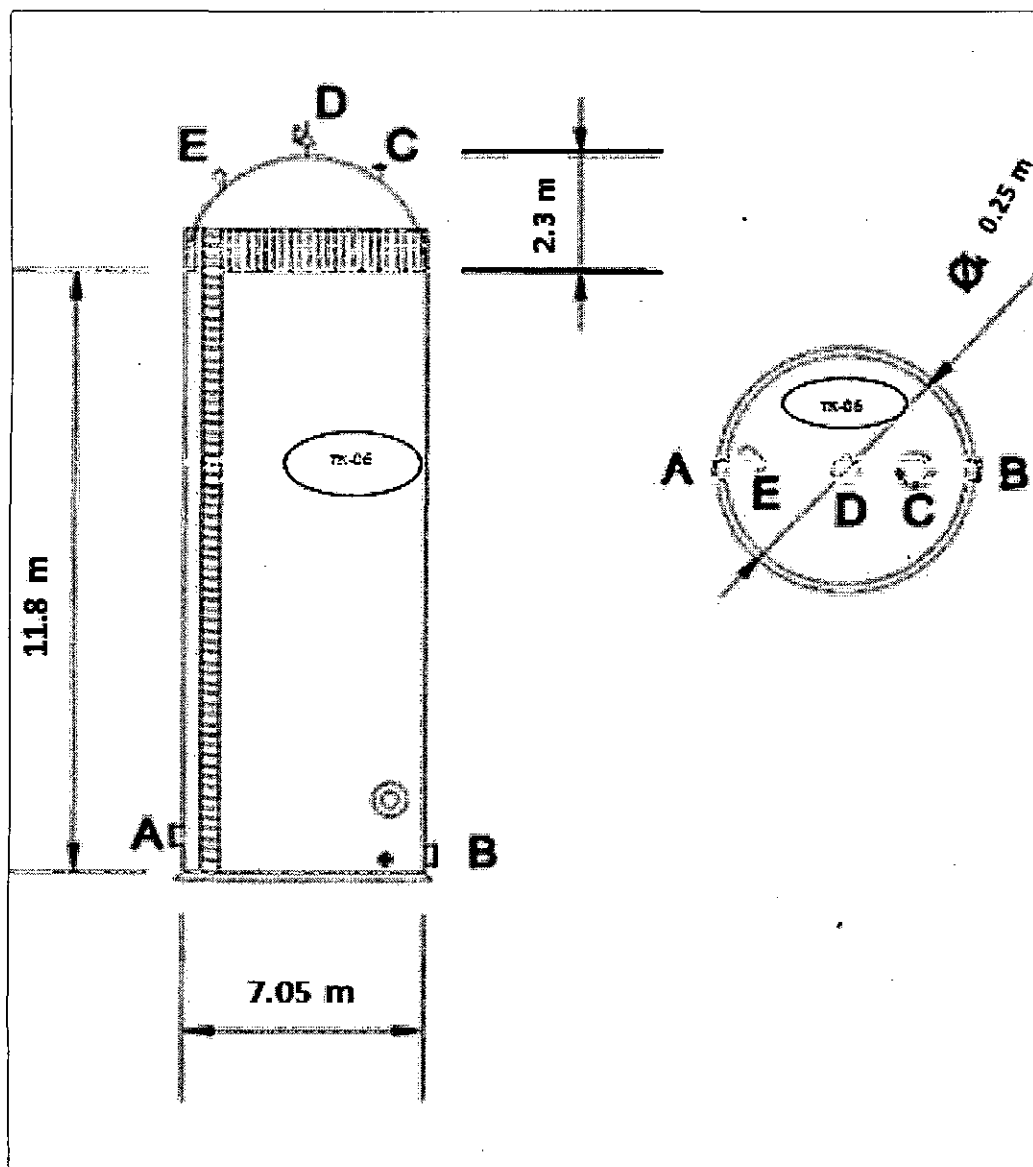
#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR


Materiales de Construcción: Acero inoxidable AISI 316				
Forma: Hemisférico/Hemisférico				
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/4	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	1/4	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	1/4	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
E	1/2	Venteo		
				

	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO</b>	Ítem N°: TK-06	Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fechas
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 2	De: 2

Designación: Tanque de almacenamiento del iniciador alcohol isopropílico

Unidades: SI (m)



	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO: J</b>	<b>Ítem N°: TK-07</b>		<b>Área</b>
		<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>	<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>		<b>Fech</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>	<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>	<b>Año</b>

#### DATOS GENERALES

Denominación: Tanque de almacenamiento del catalizador octoato de estaño

Orientación: Vertical	<b>Cantidad: 1</b>	<b>Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1250.0</b>
Volumen (m <sup>3</sup> )	<b>39.0</b>	<b>Peso equipo vacío (kg)</b>	<b>3550.0</b>
Altura (m)	<b>2.9</b>	<b>Peso equipo en operación (kg)</b>	<b>4170.0</b>
Diámetro (m)	<b>5.8</b>	<b>Fracción llenado típica</b>	<b>0.80</b>

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Material de construcción:	Catalizador octoato de estaño		
Temperatura de operación (°C)	Acero al 9% en Níquel		
Temperatura de diseño (°C)	20.0		
Presión de trabajo (atm)	25.0		
Presión de diseño (atm)	1.00		
Diámetro superior (mm)	1.20		
Diámetro inferior (mm)	3.26		
Altura (mm)	3.26		
	1.98/ Cilíndrico		


#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de Construcción: Acero al 9% en Níquel

Forma: Toriesférico / Toriesférico

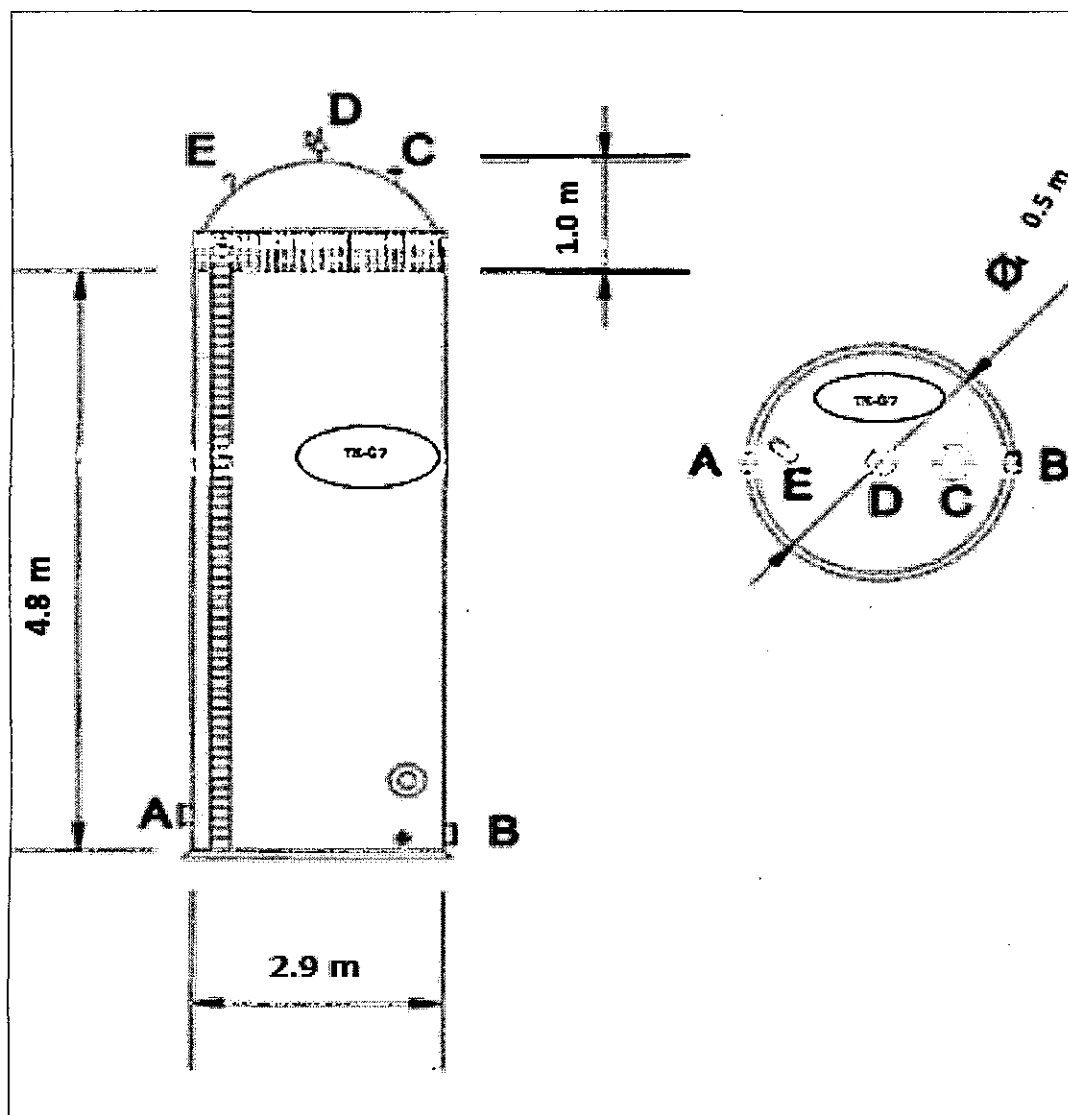
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	1/2	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	1/2	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	




	TANQUE ALMACENAMIENTO: J		Ítem N°: TK-07	Área
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fechas
			Hoja: 2	De: 2

Designación: Tanque de almacenamiento del catalizador octoato de estaño

Unidades: SI (m)



	TANQUE ALMACENAMIENTO: L	Ítem N°: TK-08	Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2

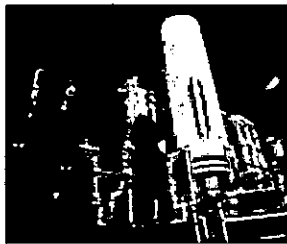
#### DATOS GENERALES


Descripción: Tanque de almacenamiento producto biopolímero ácido poliláctico (PLA)			
Orientación: Vertical	Cantidad: 2	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1210.0
Volumen (m <sup>3</sup> )	234	Peso equipo vacío (kg)	22855.0
Altura (m)	5.3	Peso equipo en operación (kg)	28426.0
Diámetro (m)	10.6	Fracción llenado típica	0.80

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Producto:	Ácido sulfúrico
Materiales de construcción:	AISI 304
Temperatura de operación (°C)	60.0
Temperatura de diseño (°C)	75.0
Presión de trabajo (atm)	1.50
Presión de diseño (atm)	1.80
Diámetro superior (mm)	5.95
Diámetro inferior (mm)	5.95
Altura (mm)	3.62/ Cilíndrico

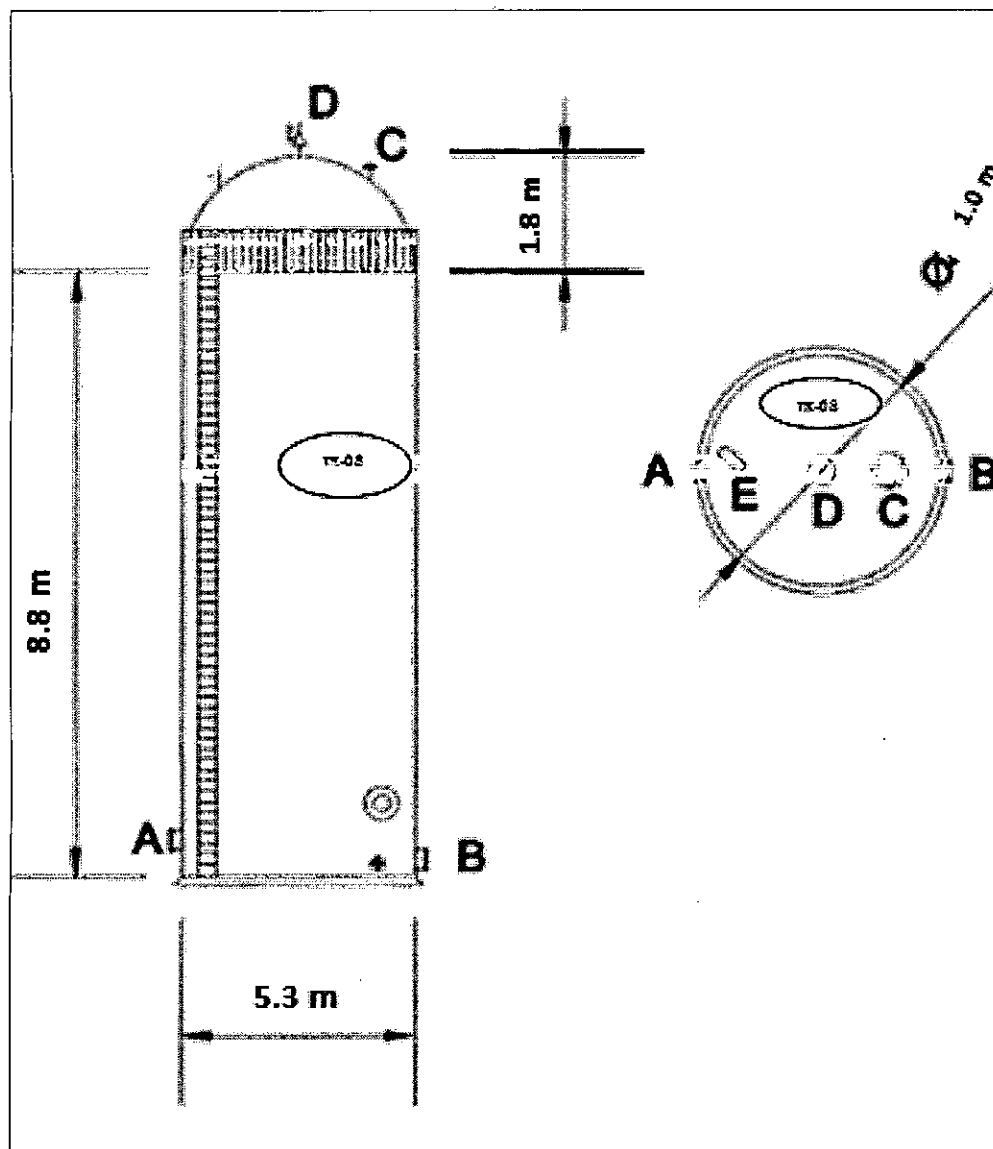
#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR


Materiales de Construcción: AISI 304				
Formas: Toriesférico / Toriesférico				
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/2	Entrada del tanque	Tratamiento térmico	No
B	1/2	Salida del tanque	Radiografiado	Parcial
C	1	Disco rotura	Eficacia de soldadura	0.85
D	3/4	Válvula de seguridad	OBSERVACIONES	
				

	<b>TANQUE ALMACENAMIENTO: L</b>	<b>Ítem N°:</b> TK-08		<b>Área</b>
		<b>Proyecto:</b> Tesis para Título de Ingeniero Químico		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química:</b> Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		<b>Preparado por:</b> Br. Karina M. Yamunaque Chero	<b>Fech</b>
	<b>Ubicación de Planta:</b> Cajamarca - Perú		<b>Hoja:</b> 2	<b>De:</b> 2

**Designación:** Tanque de almacenamiento producto biopolímero ácido poliláctico (PLA)

**Unidades:** SI (m)



	<b>PREFILTRACIÓN: A</b>	<b>Ítem N°:</b> PREF		<b>Área</b>
		<b>Proyecto:</b> Tesis para Título de Ingeniero Químico		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química:</b> Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	<b>Preparado por:</b> Br. Karina M. Yamunaque Chero		<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta:</b> Cajamarca - Perú	<b>Hoja:</b> 1	<b>De:</b> 1	<b>Agosto</b>

#### DATOS GENERALES

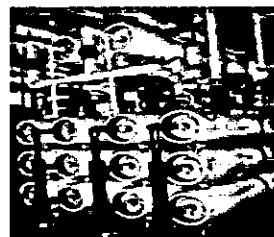
Alimentación: Prefiltrado de impurezas del lactosuero


<b>Configuración:</b> Horizontal	<b>Cantidad:</b> 1	<b>Tipo de flujo</b>	ascendente
<b>Número de orificios (mesh)</b>	155	<b>Tipo de lecho</b>	convencional
<b>Tamaño del poro (mm)</b>	0.1	<b>Caudal (GPM)</b>	105
<b>Velocidad (%)</b>	35	<b>Tiempo de operación (h)</b>	6

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

<b>Producto:</b>	Impurezas del lactosuero
<b>Tipo de filtro:</b>	Filtro de malla
<b>Material de filtro de malla:</b>	Polisulfona
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	25.0
<b>Temperatura de diseño (°C)</b>	28.0
<b>Presión de trabajo (atm)</b>	1.18
<b>Presión de diseño (atm)</b>	1.80
<b>Presión de presión (PSI)</b>	68
<b>Retención sólidos (%)</b>	75
<b>Velocidad (%)</b>	90
<b>Velocidad (m/s)</b>	0.005
<b>Área de lecho filtrante (m<sup>2</sup>)</b>	1.48

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/2	Entrada del lactosuero	
B	1/2	Salida del lactosuero tratado	
C	1/2	Salida de impurezas	



	<b>CENTRIFUGACIÓN: B</b>		Ítem N°: CENTRIF	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 1

#### DATOS GENERALES

Designación: Centrifugado


Tipología: Horizontal	Cantidad: 1	Densidad de flujo (kg/m <sup>3</sup> )	1029.0
Altura (m)	0.69	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	24.08
Longitud (m)	0.57	Peso equipo vacío (kg)	2500
Ancho (m)	0.80	Peso equipo en operación (kg)	5500

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Producto:	Grasas del lactosuero
Tipología de centrifuga:	Tambor de cámaras
Material de construcción:	Acero inoxidable 316
Marca de centrifuga:	Wesfalia Separador AG
Modelo de centrifuga:	LWA-205
Temperatura de operación (°C)	15.0
Temperatura de diseño (°C)	30.0
Presión de trabajo (atm)	1.00
Presión de diseño (atm)	1.10
Presión de presión (PSI)	8.7
Modo de operación:	intermitente
Velocidad de giro del motor (rpm)	15000
Eficiencia de retención de grasas (%)	88.0
Potencia de motor	55 kW

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de construcción:	Acero inoxidable 316
---------------------------	----------------------

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del lactosuero tratado	
B	1/2	Salida del lactosuero libre de grasas	
C	1/2	Salida de flujo de grasas	



	ULTRAFILTRACIÓN-DIAFILTRACIÓN: C	Ítem N°: DUF		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 1	Año


#### DATOS GENERALES


Mineralización: Ultrafiltración-Diafiltración			
Orientación: Horizontal	Cantidad: 1	Color de membrana	Blanco
Diámetro interno DI (mm)	100	Tamaño del poro (°A)	10-200
Diámetro externo DO (mm)	120	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	50-300
Longitud de membrana (m)	100	Fuerza compresión (lbf)	10-50

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Producto:	Minerales, proteínas y vitaminas del lactosuero
Modo de ultrafiltración-diafiltración:	Flujo Tangencial
Material de membrana:	Poliolefina
Configuración de membrana:	Asimétrica
Peso molecular de membrana (kD):	1-1000
Temperatura de operación (°C)	20.0
Temperatura de diseño (°C)	25.0
Presión de trabajo (atm)	1.00
Presión de diseño (atm)	1.18
Presión transmembrana TMP (PSI)	15.0
Modo de operación:	Continuo
Flujo de barrido (L/min/cm <sup>2</sup> )	1.41
Área de filtración (cm <sup>2</sup> )	78.0

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de construcción:		Acero inoxidable 316	
RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES 
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del lactosuero libre de grasas	
B	1/4	Entrada del agua para desmineralización	
C	1/2	Salida de lactosuero (lactosa y agua)	
D	1/2	Salida de Minerales, proteínas y vitaminas del lactosuero	

	<b>FILTRACIÓN: E-01</b>		Ítem N°: FROT-1	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 1

#### DATOS GENERALES

Designación: Filtración para remover biomasa no fermentada

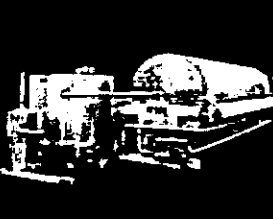
Tipología: Horizontal	Cantidad: 1	Operación:	Continuo
tiempo de operación (h)	2.0	Porosidad (%)	40.0
Diámetro (m)	15.0	Deshidratación en cada ciclo (%)	50.0
Altura (m)	8.0	Sumersión en cada ciclo (%)	30.0

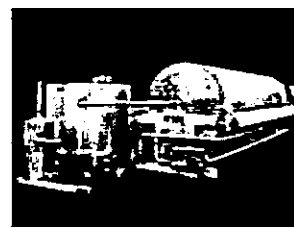
#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Producto:	Biomasa no fermentada
Tipología de filtro:	Rotatorio de vacío
Materiales de construcción:	Acero inoxidable 316
Humedad másica de la torta (%):	50.0
Temperatura de operación (°C)	25.0
Temperatura de diseño (°C)	30.0
Presión de trabajo (atm)	1.28
Presión de diseño (atm)	1.50
Presión de presión (kPa)	20.0
Altura (m)	0.05
Capacidad de la torta	15.0
Presión de torta	20.0
Capacidad de filtración (m/kg)	27.3
Área de filtración (m <sup>2</sup> )	6.97

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de construcción:		Acero inoxidable 316	
RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del primer filtro	
B	3/4	Salida del primer filtro	
C	3/4	Salida de biomasa no fermentada	





	<b>FILTRACIÓN: E-02</b>		<b>Ítem N°: FROT-2</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 1</b>

#### DATOS GENERALES

Minimización: Filtración para precipitar sulfato de calcio

<b>Tipología:</b> Horizontal	<b>Cantidad:</b> 1	<b>Operación:</b>	Continuo
<b>tiempo de operación (h)</b>	2.0	<b>Porosidad (%)</b>	45.0
<b>diámetro (m)</b>	16.0	<b>Deshidratación en cada ciclo (%)</b>	55.0
<b>altura (m)</b>	8.5	<b>Sumersión en cada ciclo (%)</b>	38.0

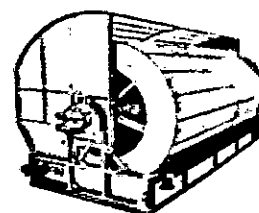
#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


<b>Producto:</b>	Sulfato de calcio
<b>tipo de filtro:</b>	Rotatorio de vacío
<b>Material de construcción:</b>	Acero inoxidable 316
<b>humidificación másica de la torta (%):</b>	98.0
<b>temperatura de operación (°C)</b>	45.0
<b>temperatura de diseño (°C)</b>	53.0
<b>presión de trabajo (atm)</b>	1.20
<b>presión de diseño (atm)</b>	1.40
<b>presión de presión (kPa)</b>	50.0
<b>radio (m)</b>	0.15
<b>espesor de la torta</b>	25.0
<b>presión de torta</b>	28.0
<b>velocidad de filtración (m/kg)</b>	35.3
<b>área de filtración (m<sup>2</sup>)</b>	8.50

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

<b>Material de construcción:</b>	Acero inoxidable 316
----------------------------------	----------------------

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del segundo filtro	
B	3/4	Salida del segundo filtro	
C	1/4	Salida de sulfato de calcio	



	<b>DECANTACIÓN: H-01</b>		<b>Ítem N°:</b> DEC1	<b>Área:</b>
			<b>Proyecto:</b> Tesis para Título de Ingeniero Químico	<b>Proceso:</b>
	<b>Planta Química:</b> Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		<b>Preparado por:</b> Br. Karina M. Yamunaque Chero	<b>Fechas:</b>
	<b>Ubicación de Planta:</b> Cajamarca - Perú		<b>Hoja:</b> 1	<b>De:</b> 1

#### DATOS GENERALES

Denominación: Separación del lactato de calcio

Configuración: Horizontal	<b>Cantidad:</b> 1	<b>Operación:</b>	Continuo
Tiempo de operación (h)	3.0	Diámetro (m)	2.2
Altura (m)	4.0	Diámetro del motor (m)	1.2
Peso del equipo (kg)	0.3	Peso del equipo (kg)	5000

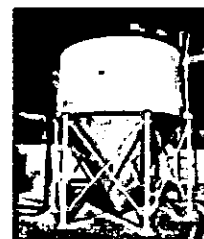
#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Medio de trabajo:	Lactato de calcio, agua y ácido sulfúrico
Materiales del rotor:	DUPLEX
Materiales de construcción:	AISI 316
Modelo del decantador:	ALDEC 95
Temperatura de operación (°C)	45.0
Temperatura de diseño (°C)	53.0
Presión de trabajo (atm)	1.00
Presión de diseño (atm)	1.20
Presión de prueba (kPa)	50.0
Control de arranque:	Star-delta VFD
Potencia del motor (Kw)	75.0

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Materiales de construcción:	AISI 316
-----------------------------	----------

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del primer decantador	
B	1/4	Salida del primer decantador	
C	3/4	Salida de Lactato de calcio, agua y ácido sulfúrico	



	<b>DECANTACIÓN: H-02</b>		<b>Ítem N°:</b> DEC2	<b>Área:</b>
	<b>Planta Química:</b> Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		<b>Proyecto:</b> Tesis para Título de Ingeniero Químico	<b>Proceso:</b>
	<b>Ubicación de Planta:</b> Cajamarca - Perú		<b>Preparado por:</b> Br. Karina M. Yamunaque Chero	<b>Fecha:</b>
			<b>Hoja:</b> 1	<b>De:</b> 1

#### DATOS GENERALES

**Denominación:** Separación y recuperación del catalizador octoato de estaño

<b>Configuración:</b> Horizontal	<b>Cantidad:</b> 1	<b>Operación:</b>	Continuo
<b>Tiempo de operación (h)</b>	2.5	<b>Diámetro (m)</b>	2.5
<b>Altura (m)</b>	5.0	<b>Diámetro del motor (m)</b>	1.5
<b>Peso (kg)</b>	0.4	<b>Peso del equipo (kg)</b>	6500

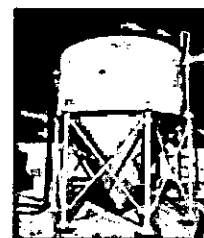
#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


<b>Medio:</b>	Lactato de calcio, agua y ácido sulfúrico
<b>Materiales del rotor:</b>	DUPLEX
<b>Materiales de construcción:</b>	AISI 316
<b>Modelo del decantador:</b>	ALDEC 95
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	200.0
<b>Temperatura de diseño (°C)</b>	235.0
<b>Presión de trabajo (atm)</b>	1.00
<b>Presión de diseño (atm)</b>	1.20
<b>Presión de presión (kPa)</b>	100.0
<b>Modo de arranque:</b>	Star-delta VFD
<b>Potencia del motor (Kw)</b>	90.0

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

<b>Materiales de construcción:</b>	AISI 316
------------------------------------	----------

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del segundo decantador	
B	1/2	Salida del ácido poliláctico (PLA)	
C	3/4	Salida del catalizador octoato de estaño	



	<b>EQUIPO DE RECIRCULACIÓN</b>		Ítem N°: RECIR-1	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 1

#### DATOS GENERALES

Descripción: Recuperación y recirculación del ácido láctico

Tipología: Vertical	Cantidad: 1	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	783.5
Altura de operación (h)	3.0	Peso equipo vacío (kg)	8387.1
Longitud (m)	5.3	Peso equipo en operación (kg)	9887.1
Diámetro (m)	8.0	Espesor (m)	0.50

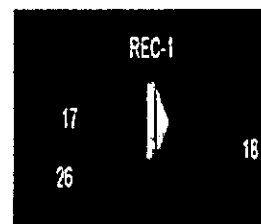
#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Medio:	Ácido láctico
Materia de construcción:	AISI 316
Flujo (m <sup>3</sup> /h)	5.492
Temperatura de operación (°C)	45.0
Temperatura de diseño (°C)	53.0
Presión de trabajo (atm)	1.40
Presión de diseño (atm)	1.65
Presión de prueba (kPa)	10.0
Potencia del equipo (Kw)	3494.0

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Materia de construcción:	AISI 316
--------------------------	----------

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del primer equipo de recirculación	
B	1/4	Salida del primer equipo de recirculación	
C	1/4	Salida de recirculación ácido láctico y agua	



	<b>EQUIPO DE RECIRCULACIÓN</b>		Ítem N°: RECIR-2	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 1

#### DATOS GENERALES

Denominación: Recuperación y recirculación del dímero lactida

Configuración: Vertical	Cantidad: 1	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1250.0
Tiempo de operación (h)	3.0	Peso equipo vacío (kg)	3366.3
Altura (m)	1.5	Peso equipo en operación (kg)	4488.4
Diámetro (m)	2.3	Espesor (m)	0.80

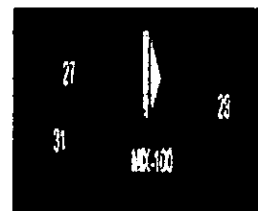
#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Producto:	Dímero lactida
Material de construcción:	AISI 316
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	1.431
Temperatura de operación (°C)	124.3
Temperatura de diseño (°C)	146.2
Presión de trabajo (atm)	0.56
Presión de diseño (atm)	0.66
Presión de prueba (kPa)	15.0
Potencia del equipo (Kw)	156.944

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de construcción:	AISI 316
---------------------------	----------

RELACION DE CONEXIONES			OBSERVACIONES
Marca	DN (")	Denominación	
A	1/4	Entrada del segundo equipo recirculación	
B	1/4	Salida del segundo equipo recirculación	
C	1/4	Salida de recirculación dímero lactida	



	<b>EVAPORACIÓN: F-01</b>		Ítem N°: EVAP1	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 1

#### DATOS GENERALES

Designación: Evaporador para concentración del lactato de calcio

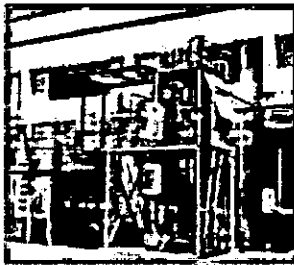
Orientación: Vertical	Cantidad: 1	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1197.1
Flujo de alimentación (kg/h)	26130.6	Peso equipo vacío (kg)	6212.9
Altura (m)	4.54	Peso equipo en operación (kg)	11493.8
Temperatura (m)	8.63	Producto fase líquida (kg/h)	19135.2
Presión (m <sup>3</sup> )	131.0	Fracción másica de vapor	1.0

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR


Producto:	Concentración del lactato de calcio al 30% p/p
Tipología de evaporador	Simple efecto con tubos verticales
Material de revestimiento	Ti6Al4V
Temperatura de operación (°C)	80.0
Temperatura de diseño (°C)	94.0
Presión de trabajo (atm)	0.60
Presión de diseño (atm)	1.0
Diámetro superior (mm)	2.3
Diámetro inferior (mm)	2.3
Longitud (mm)	5.5/ Cilíndrico
Número de tubos/longitud (m)	50/15.0

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de Construcción: Acero al carbono A515	Área de calentamiento (m <sup>2</sup> ): 47
Forma: Torisférico/ Torisférico	Diámetro : 3/4 "

RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/2	Entrada del primer evaporador	Tratamiento térmico	No
B	1/4	Salida del vapor	Radiografiado	Parcial
C	1/2	Salida de lactato de calcio concentrado	Eficacia de soldadura	0.85
D	1	Disco rotura	OBSERVACIONES	
E	1/2	Válvula de seguridad		
F	1	Ventoso		
				

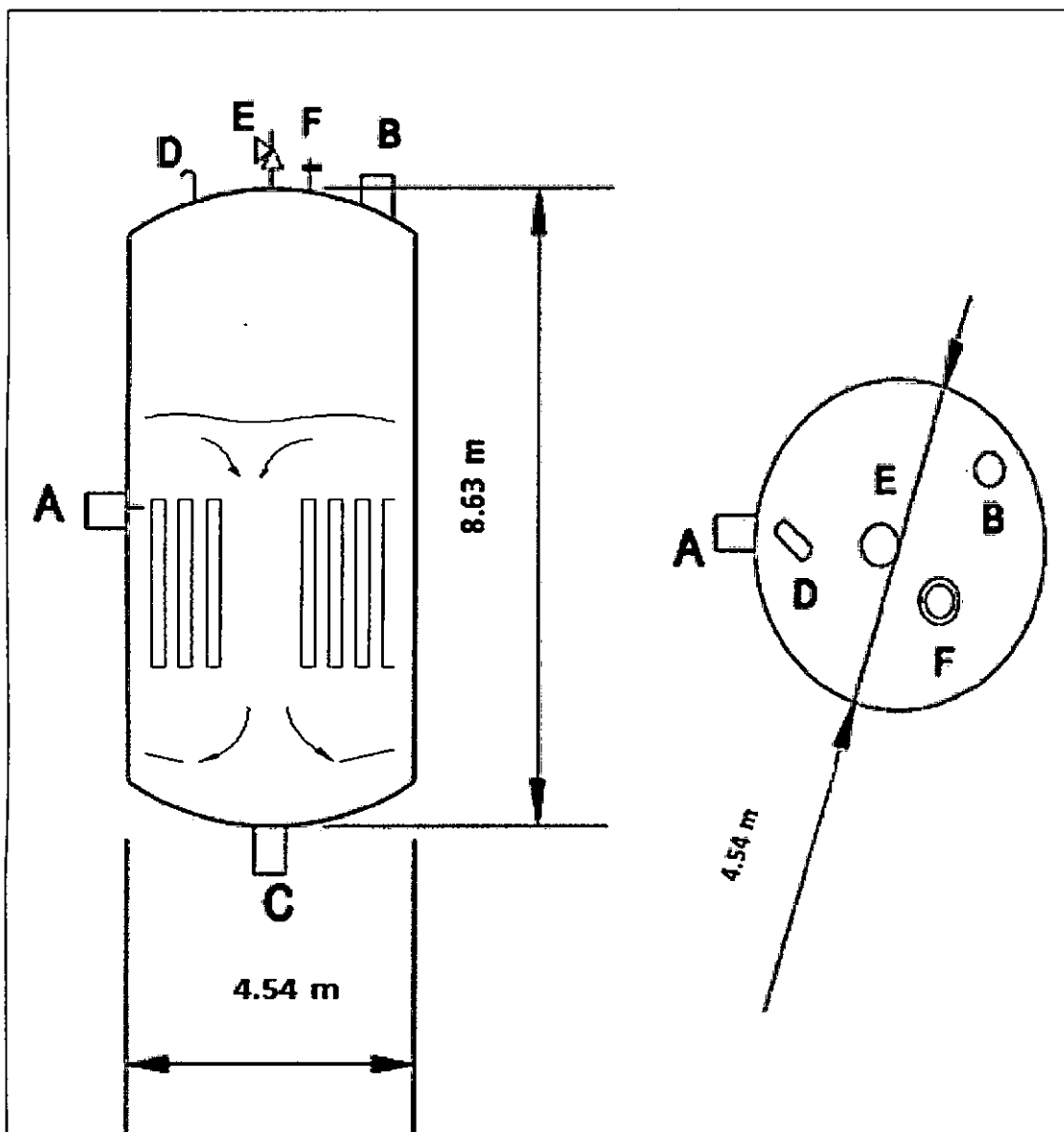



	<b>EVAPORACIÓN: F-01</b>		<b>Ítem N°: EVAP1</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

Designación: Evaporador para concentración del lactato de calcio

Unidades: SI (m)



	<b>EVAPORACIÓN: F-02</b>		<b>Ítem N°: EVAP2</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fech</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

Designación: Evaporador para concentración del ácido láctico


Configuración: Vertical	Cantidad: 2	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1078.3
Flujo de alimentación (kg/h)	24782.1	Peso equipo vacío (kg)	5596.4
Altura (m)	4.61	Peso equipo en operación (kg)	10353.3
Longitud (m)	8.77	Producto fase líquida (kg/h)	7567.5
Presión (m <sup>3</sup> )	145.7	Fracción másica de vapor	1.0


#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Concentración:	Concentración del ácido láctico al 90% p/p
Tipología de evaporador:	Doble efecto con tubos verticales
Material de revestimiento:	Ti6Al4V
Temperatura de operación (°C)	80.0
Temperatura de diseño (°C)	94.0
Presión de trabajo (atm)	1.20
Presión de diseño (atm)	1.40
Diámetro superior (mm)	2.35
Diámetro inferior (mm)	2.35
Forma (mm)	5.6/ Cilíndrico
Longitud de tubos/longitud (m)	72/15.0

#### DATOS DE DISEÑO/EXTERIOR

Material de Construcción: Acero al carbono A515	Área de calentamiento (m <sup>2</sup> ): 67
Forma: Torisférico/ Torisférico	Diámetro: 3/4 "

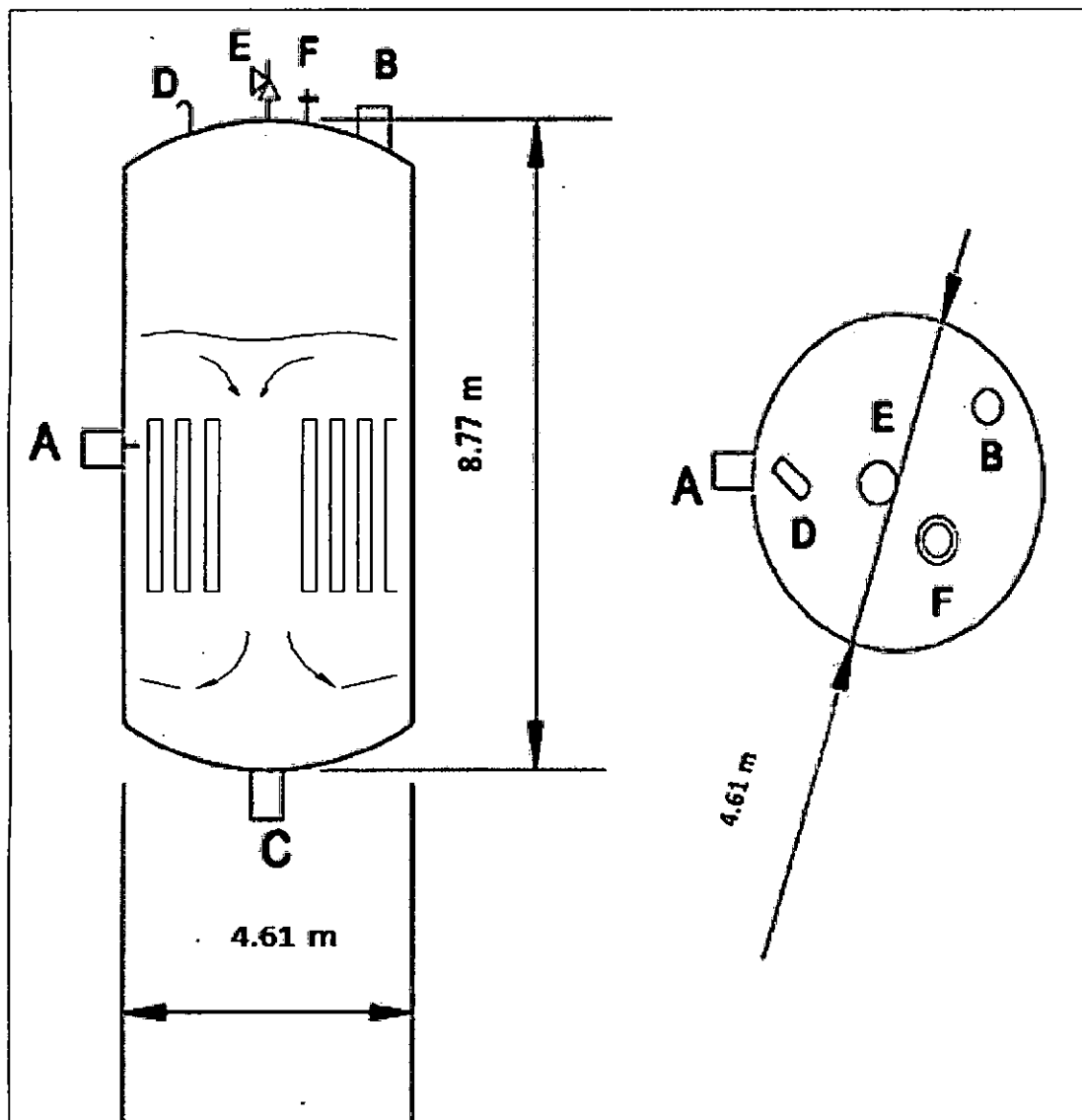
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Marca	DN (")	Denominación	Norma de diseño	ASME
A	1/2	Entrada del segundo evaporador	Tratamiento térmico	No
B	1/4	Salida del vapor	Radiografiado	Parcial
C	1/2	Salida del ácido láctico concentrado	Eficacia de soldadura	0.85
D	1	Disco rotura	OBSERVACIONES	
E	1/2	Válvula de seguridad		
F	1	Venteo		
				


	EVAPORACIÓN: F-01		Ítem N°: EVAP1	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 2

#### DATOS GENERALES

Designación: Evaporador para concentración del ácido láctico

Unidades: SI (m)



	<b>INTERCAMBIADOR DE CALOR: EX-01</b>		<b>Ítem N°: EX-01</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

**Función:** Intercambiador de calor carcasa y tubo para calentamiento del lactato de calcio

**Medios manipulados:** Lactato de calcio, vapor de agua y productos secundarios


#### DATOS DE DISEÑO


	CARCASA		TUBOS	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
	SOLUCIÓN		VAPOR	
Fases	L	L-V	V	V
Caudal total (kg/h)	26130.6	26130.6	1230000.0	1230000.0
Temperatura operación (°C)	25.0	80.0	150.0	120.0
Presión trabajo (atm)	1.00	1.30	2.50	0.52
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1026.5	1026.5	997.9	997.9
Viscosidad (cP)	0.8873	0.8873	1.4102*E-02	1.294*E-02
Calor específico(kJ/kg*°C)	4.1011	1.9596	1.9449	1.9084
Conductividad térmica (W/m <sup>2</sup> *°C)	1.9472	0.6232	0.2909	0.2606
Número de pasos	2		2	

#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

	CARCASA	TUBOS	
Temperatura diseño (°C)	94.0	176.0	
Presión diseño (atm)	1.30	1.53	
Material de construcción	AISI-304	AISI-304	
Diámetro/espesor (mm)	3048/18	304.8/9	
Longitud (m)	3.658	4.389	
Aislante/espesor (mm)	MANTA SPINTEX 342-G-125/25		
Calor de intercambio (KJ/h)	6.132*E+07	N° pantallas	4
Coefficiente global (kJ/h*m <sup>2</sup> *°C)	949.6	Espaciado pantallas (mm)	127.0
Área intercambio (m <sup>2</sup> )	60.5	LMTD (°C)	81.86
N° Tubos	80	Peso equipo vacío	1022.9
Arreglo	triangular	Peso equipo con agua (kg)	2344.2
Espaciado (mm)	31.75	Peso equipo en operación (kg)	2041.4

#### RELACION DE CONEXIONES

Marca	DN (")	Denominación	OBSERVACIONES
A	20	Entrada por carcasa de solución fría	
B	24	Entrada por tubos de vapor de agua	
C	10	Salida por carcasa de solución caliente	
D	20	Salida por tubos de vapor de agua fría	

	<b>INTERCAMBIADOR DE CALOR: EX-02</b>		<b>Ítem N°: EX-02</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fech</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

**Descripción:** Intercambiador de doble tubo para calentamiento del ácido láctico

**Medios manipulados:** Ácido láctico, vapor de agua y productos secundarios


#### DATOS DE DISEÑO


	ÁNULO		TUBO INTERIOR	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
	SOLUCIÓN		VAPOR	
Fase	L	L	V	V
Caudal total (kg/h)	24782.1	24782.1	1212000.0	1212000.0
Temperatura operación (°C)	45.0	90.0	140.0	100.0
Presión trabajo (atm)	0.50	1.50	1.00	0.53
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1026.1	1026.1	1214.5	1214.5
Viscosidad (cP)	0.8018	0.3852	1.3162*E-02	1.0783*E-02
Calor específico(kJ/kg*°C)	7.3820	2.2045	1.8582	1.5903
Conductividad térmica (W/m <sup>2</sup> *°C)	3.5050	0.7011	0.2715	0.2117
Número de pasos	3		3	

#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

	CARCASA	TUBOS	
Temperatura diseño (°C)	105.0	165.0	
Presión diseño (atm)	1.75	1.18	
Material de construcción	Acero al Carbono Schedule 40	Acero al Carbono Schedule 40	
Diámetro/espesor (mm)	1270/1.52	4080/3.00	
Longitud (m)	4.60	5.50	
Aislante/espesor (mm)	MANTA SPINTEX 342-G-125/25		
Calor de intercambio (KJ/h)	4.647*E+06	Caída de presión (kPa)	40.53
Coeficiente global (kJ/h*m²*°C)	1590.0	Factor de obstrucción	0.003
Área intercambio (m²)	7.72	LMTD (°C)	52.5
N° Horquillas	5	Peso equipo vacío	1020.1
N° Intercambiadores de calor	2 colocados en paralelo	Peso equipo con agua (kg)	2277.6
Volumen (m³)	3.33	Peso equipo en operación (kg)	1936.0

#### RELACION DE CONEXIONES

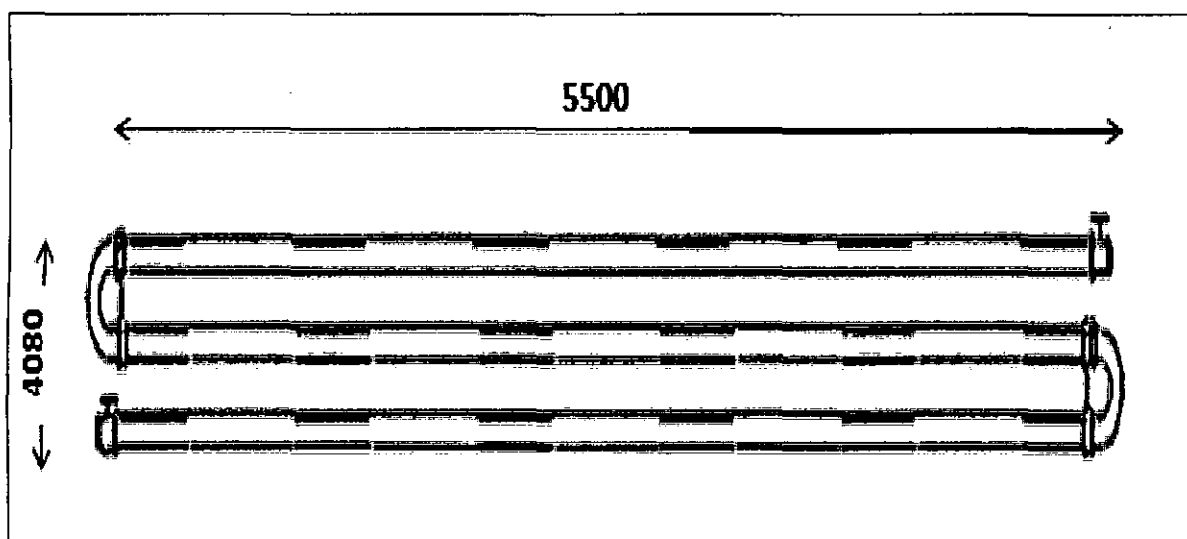
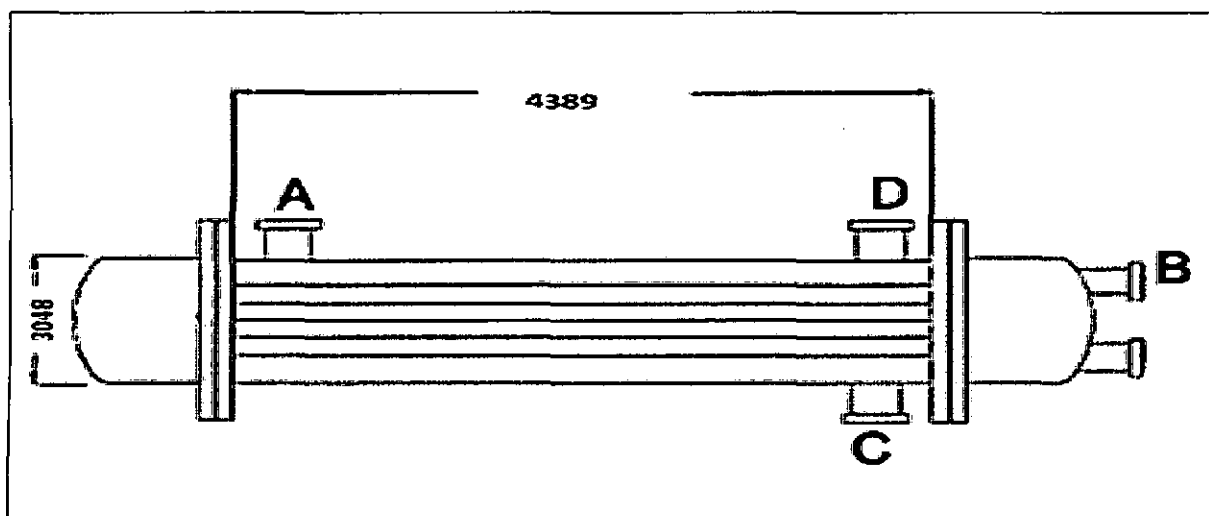
Marca	DN (")	Denominación	OBSERVACIONES
A	10	Entrada por ánulo de solución fría	
B	15	Entrada de tubo interior vapor de agua	
C	8	Salida por ánulo de solución caliente	
D	10	Salida de tubo interior vapor de agua fría	


	<b>INTERCAMBIADOR DE CALOR: F-01</b>		Ítem N°: EX-01, EX-02	Área
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Procedimiento
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fecha
			Hoja: 2 De: 2	Aprobado

#### DATOS GENERALES

Designación: Intercambiador de calor carcasa y tubo para calentamiento del lactato de calcio  
Intercambiador de doble tubo para calentamiento del ácido láctico

Unidades: SI (mm)



	<b>REACTOR: RX-FERNEU</b>		<b>Ítem N°: D-01</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

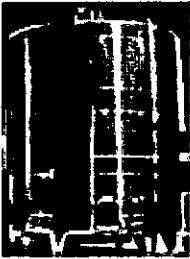
**Función:** Reactor de fermentación - neutralización


**Medios manipulados:** Solución de lactosa, Inóculo (*Lactobacillus Bulgaricus*) e Hidróxido de calcio (lechada de cal)

<b>Orientación:</b> Vertical	<b>Cantidad:</b> 3	<b>Volumen (m³)</b>	490.0
<b>Forma de cuerpo/fondo:</b>	Torresférico/ Torresférico	<b>Densidad del fluido (kg/m³)</b>	1026.5
<b>Altura (m)</b>	13.6	<b>Peso equipo vacío (kg)</b>	7546.0
<b>Ancho (m)</b>	6.8	<b>Peso equipo en operación (kg)</b>	91719.0

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

<b>Medio:</b>	Ácido Láctico y Lactato de calcio
<b>Materia de construcción:</b>	Acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L
<b>Revestimiento:</b>	Manta spintex 342-G-125
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	48.0
<b>Temperatura de diseño (°C)</b>	56.6
<b>Presión de trabajo (atm)</b>	2.00
<b>Presión de diseño (atm)</b>	2.40
<b>Espesor del cuerpo (mm)</b>	11.55
<b>Espesor del cabezal (mm)</b>	7.35
<b>Espesor del fondo (mm)</b>	7.35
<b>Materia de Revestimiento interior:</b>	Neopreno

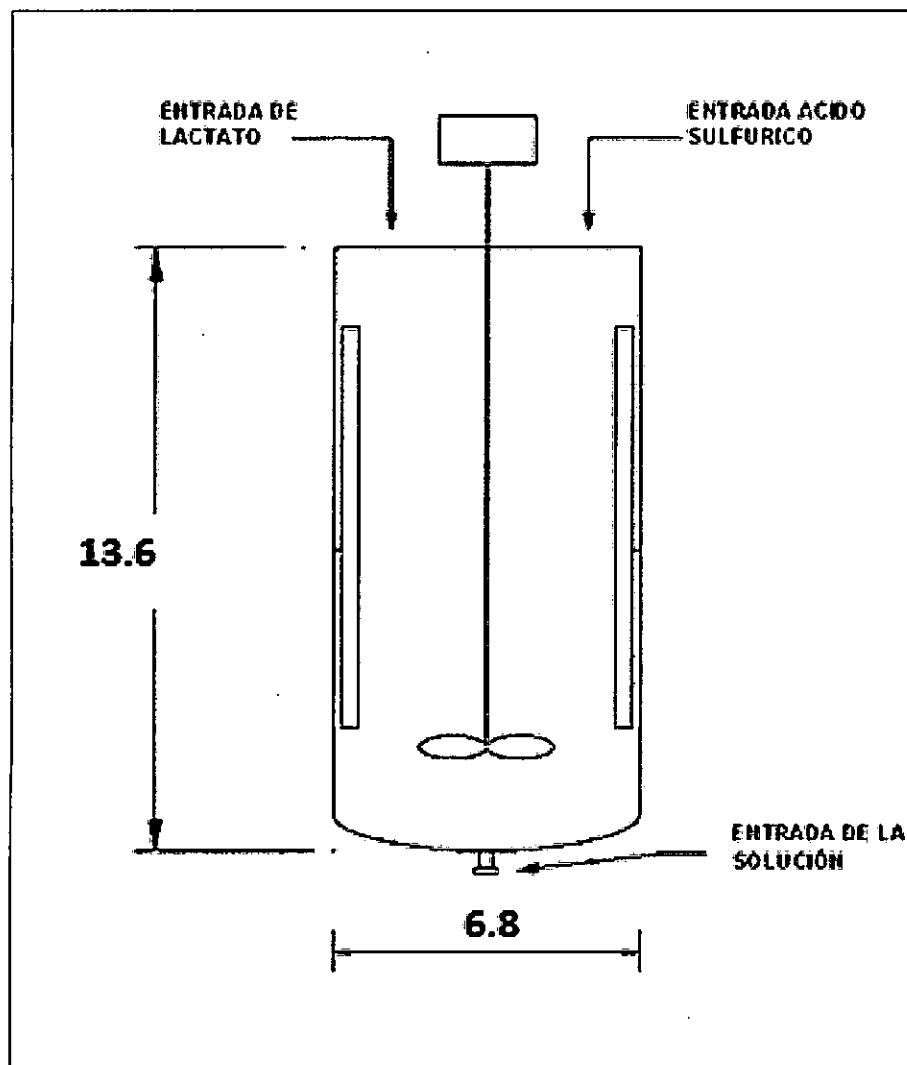
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Característica	DN (")	Denominación	Norma de diseño aplicada	ASME
A	3	Entrada al reactor solución de lactosa	Tratamiento térmico	No
B	1	Entrada al reactor de inóculo (5%V/V)	Radiografiado	Parcial
C	1/2	Entrada al reactor de hidróxido de calcio	Eficacia de soldadura	0.85
D	5	Salida de solución del reactor	<b>OBSERVACIONES</b> 	
E	1 ½	Ventosa		

	<b>REACTOR: RX-FERNEU</b>	<b>Ítem N°: D-01</b>		<b>Área</b>
		<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>		<b>Hoja: 2</b>	<b>De: 2</b>


#### DATOS GENERALES

Designación: Reactor de fermentación - neutralización

Unidades: SI (m)





	<b>REACTOR: RX-ACID</b>		Ítem N°: G	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú		Hoja: 1	De: 2

#### DATOS GENERALES

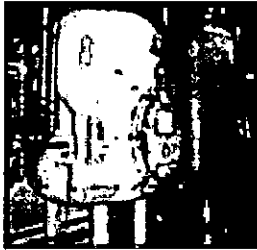
Mineración: Reactor de acidulación


Medios manipulados: Solución de lactosa, hidróxido de sodio, lactato de calcio y ácido sulfúrico

Forma: Vertical	Cantidad: 1	Volumen (m <sup>3</sup> )	40.44
Forma de cuerpo/fondo	Torresférico/ Torresférico	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )	1066.9
Altura (m)	5.91	Peso equipo vacío (kg)	7841.7
Diámetro (m)	2.95	Peso equipo en operación (kg)	93954.1

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

Medio: Ácido láctico y sulfato de calcio	
Materia de construcción: Acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L	
Revestimiento: Manta spintex 342-G-125	
Flujo de agua medio refrigerante (kg/h)	12575.0
Temperatura de operación (°C)	48.0
Temperatura de diseño (°C)	56.6
Presión de trabajo (atm)	2.00
Presión de diseño (atm)	2.40
Espesor del cuerpo (mm)	4.72
Espesor del cabezal (mm)	3.96
Espesor del fondo (mm)	3.96
Materia de Revestimiento interior: Neopreno	

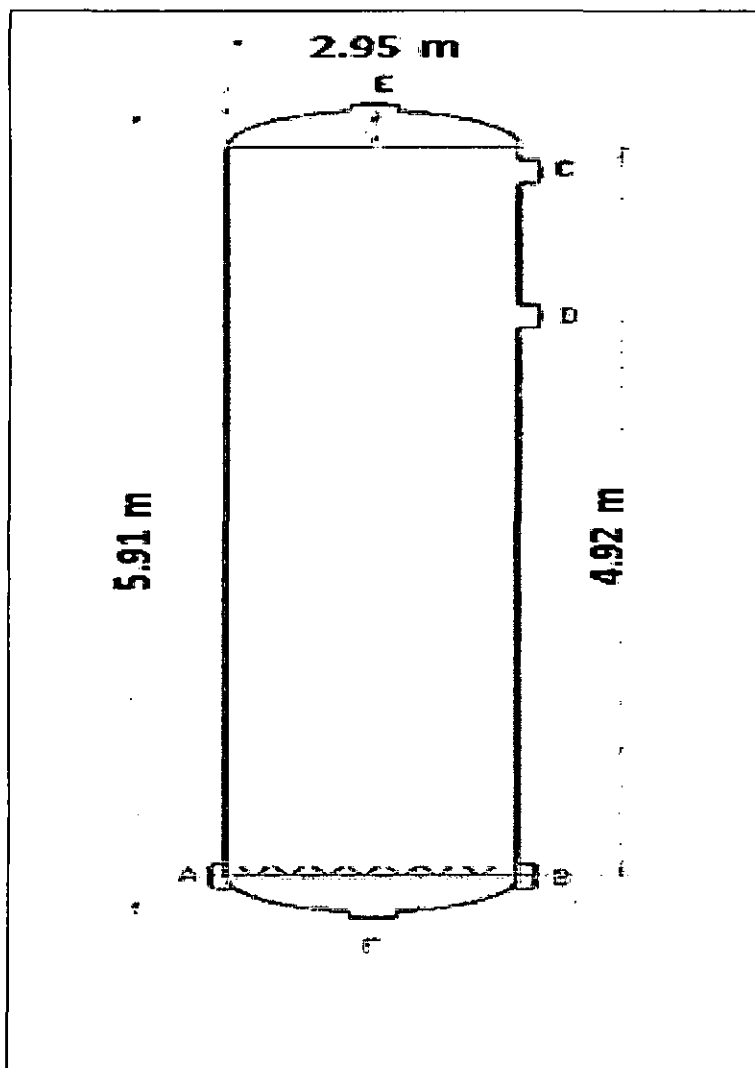
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Letra	DN (")	Denominación	Norma de diseño aplicada	ASME
A	1	Entrada de solución al reactor	Tratamiento térmico	No
B	1	Entrada del agua como refrigerante	Radiografiado	Parcial
C	1/2	Entrada de ácido sulfúrico al reactor	Eficacia de soldadura	0.85
D	3	Salida de solución del reactor	OBSERVACIONES	
E	1 ½	Venteo		
				


	REACTOR: RX-ACID	Ítem N°: G		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú	Hoja: 1	De: 2	Año:

#### DATOS GENERALES

Designación: Reactor de acidulación

Unidades: SI (m)



	<b>REACTOR: RX-PREPOLIM</b>		<b>Ítem N°: 1</b>	<b>Área</b>
			<b>Proyecto:</b> Tesis para Título de Ingeniero Químico	<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química:</b> Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		<b>Preparado por:</b> Br. Karina M. Yamunaque Chero	<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta:</b> Cajamarca – Perú		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

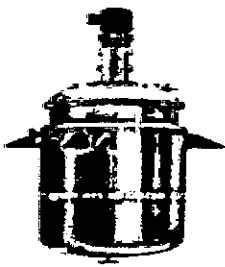
**Tipología:** Reactor de prepolimerización


**Medios manipulados:** Agua, ácido láctico y el dímero lactida

<b>Orientación:</b> Vertical	<b>Cantidad:</b> 1	<b>Volumen (m³)</b>	72.0
<b>Forma de cuerpo/fondo</b>	Torresférico/ Torresférico	<b>Densidad del fluido (kg/m³)</b>	783.95
<b>Altura (m)</b>	7.14	<b>Peso equipo vacío (kg)</b>	5562.0
<b>Anchura (m)</b>	3.58	<b>Peso equipo en operación (kg)</b>	19036.7

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

<b>Medio:</b>	Dímero lactida
<b>Materia de construcción:</b>	Acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L
<b>Norma:</b>	BX-SPINTEX 613-40
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	150.0
<b>Temperatura de diseño (°C)</b>	180.0
<b>Presión de trabajo (atm)</b>	0.66
<b>Presión de diseño (atm)</b>	0.85
<b>Espesor del cuerpo (mm)</b>	7.8
<b>Espesor del cabezal (mm)</b>	5.5
<b>Espesor del fondo (mm)</b>	5.5
<b>Materia de Revestimiento interior :</b>	AISI 316

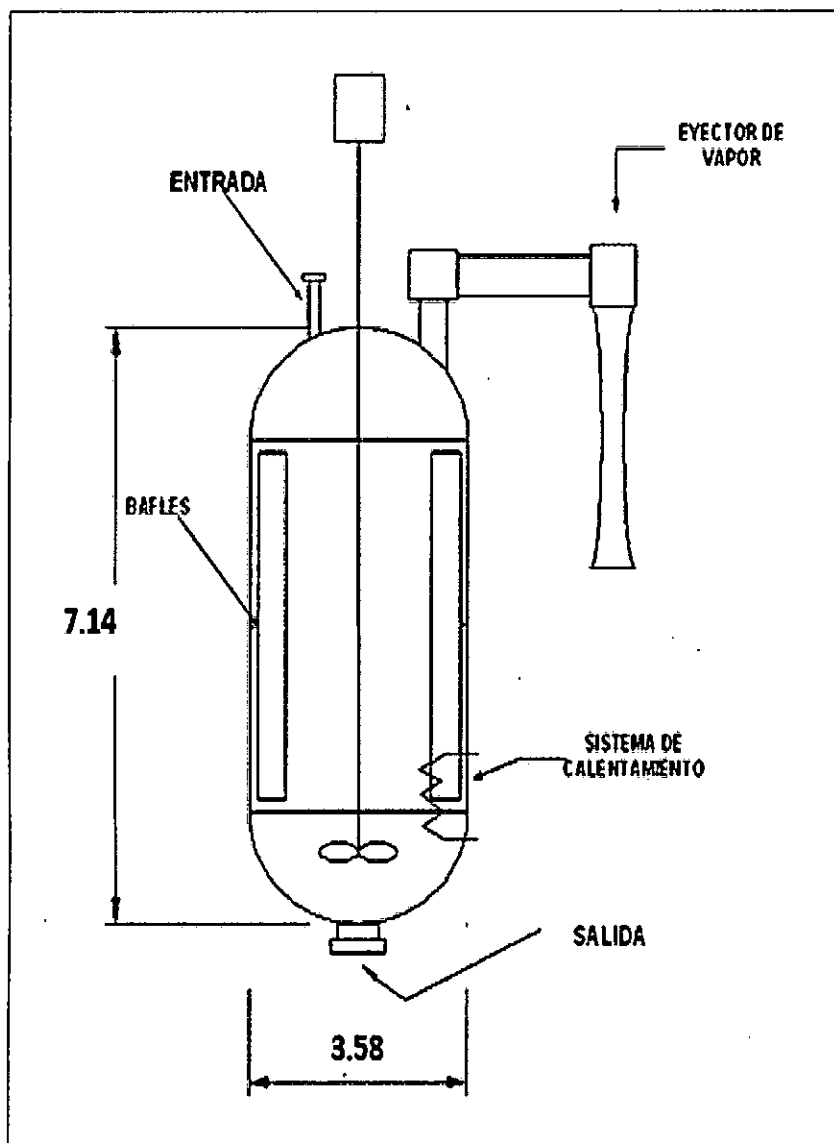
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Característica	DN (")	Denominación	Norma de diseño aplicada	ASME
A	2	Entrada de solución al reactor	Tratamiento térmico	No
B	1	Salida de solución al reactor para recirculación	Radiografiado	Parcial
C	2	Salida del dímero lactida del reactor	Eficacia de soldadura	0.85
D	1/4	Válvula de seguridad	<b>OBSERVACIONES</b> 	
E	1 ½	Ventoso		


	REACTOR: RX-PREPOLIM		Ítem N°: 1	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú		Hoja: 1	De: 2

#### DATOS GENERALES

Designación: Reactor de prepolimerización

Unidades: SI (m)



	<b>REACTOR: RX-POLIM</b>		<b>Ítem N°: K</b>		<b>Área</b>
			<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>		<b>Proceso</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>		<b>Fechas</b>
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>	<b>Año</b>

#### DATOS GENERALES

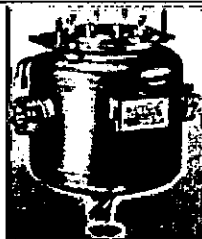
**Tipología:** Reactor de polimerización


**Medios manipulados:** Dímero lactida, iniciador alcohol isopropílico y catalizador octoato de estaño

<b>Configuración:</b> Vertical	<b>Cantidad: 1</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	151.2
<b>Forma de cuerpo/fondo</b>	Torresférico/ Torresférico	<b>Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1026.5
<b>Altura (m)</b>	7.56	<b>Peso equipo vacío (kg)</b>	7282.8
<b>Ancho (m)</b>	5.04	<b>Peso equipo en operación (kg)</b>	18348.4

#### DATOS DE DISEÑO/INTERIOR

<b>Producto:</b>	Biopolímero ácido poliláctico (PLA)
<b>Material de construcción:</b>	AISI 317-L
<b>Norma:</b>	BX-SPINTEX 613-40
<b>Flujo de salmuera medio refrigerante (kg/h)</b>	280294, 25 % concentración
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	179.0
<b>Temperatura de diseño (°C)</b>	200.0
<b>Presión de trabajo (atm)</b>	1.80
<b>Presión de diseño (atm)</b>	2.00
<b>Diámetro del cuerpo (mm)</b>	7.26
<b>Diámetro del cabezal (mm)</b>	5.22
<b>Diámetro del fondo (mm)</b>	5.22
<b>Material de Revestimiento interior :</b>	Aleación de Titanio Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V

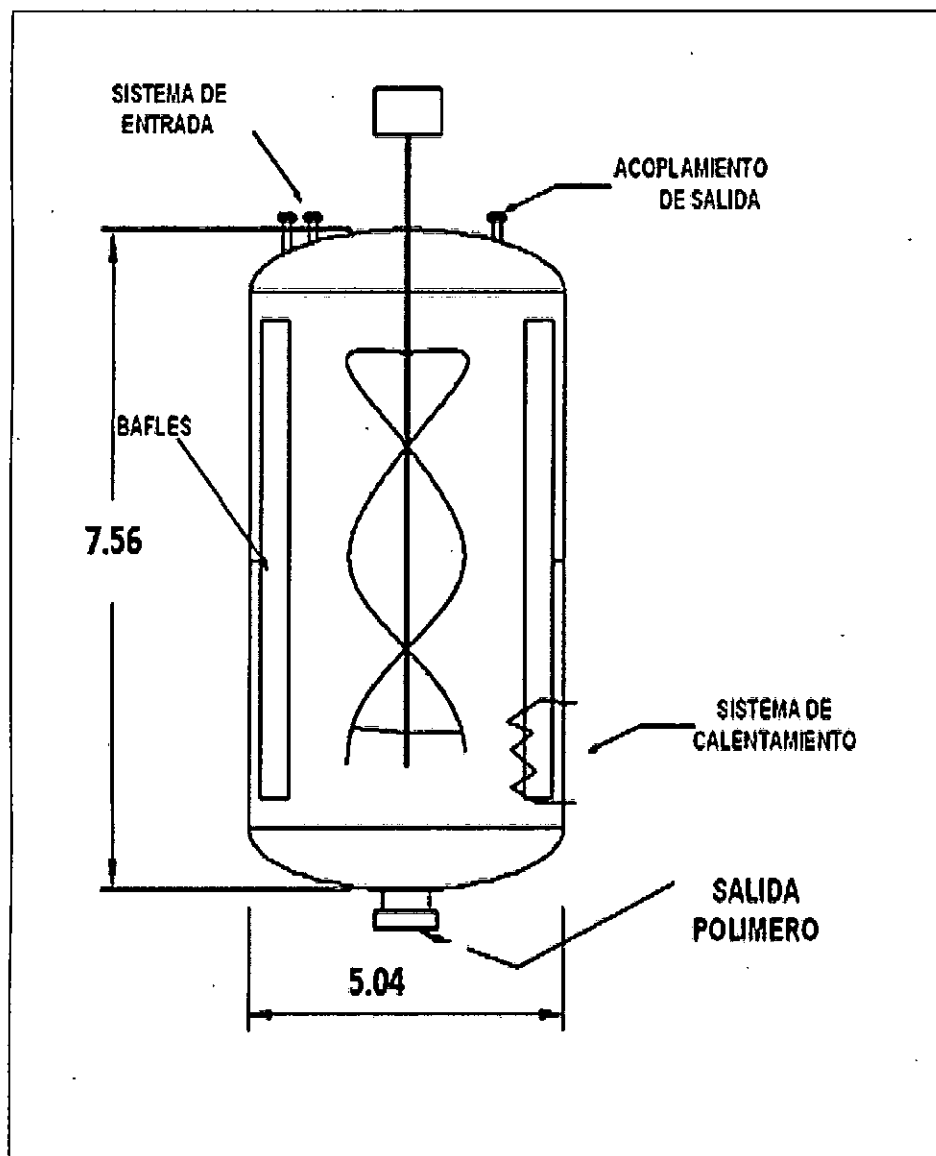
RELACION DE CONEXIONES			DETALLES DE DISEÑO	
Orden	DN (")	Denominación	Norma de diseño aplicada	ASME
1	2	Entrada del dímero lactida al reactor	Tratamiento térmico	No
2	1	Entrada del iniciador alcohol isopropílico	Radiografiado	Parcial
3	2	Salida dímero lactida del reactor	Eficacia de soldadura	0.85
4	3	Salida biopolímero ácido poliláctico (PLA) del reactor	<b>OBSERVACIONES</b> 	
5	1 ½	Entrada del catalizador octoato de estaño		
6				
7				


	REACTOR: RX-POLIM		Ítem N°: K	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fechas
	Ubicación de Planta: Cajamarca – Perú		Hoja: 1	De: 2

#### DATOS GENERALES

Designación: Reactor de polimerización

Unidades: SI (m)



	<b>ESPECIFICACIÓN DE BOMBA</b>	Ítem N°: P-1		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proyecto
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fecha
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Agosto

#### DATOS GENERALES

Tipificación: Bomba centrífuga

Medios manipulados: Materia prima lactosuero

#### DATOS DE DISEÑO

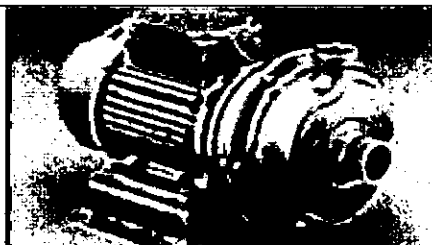
Medio	Materia prima lactosuero
Caudal de operación (GPM)	111.7
Viscosidad (cp)	28.4
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1038.1
Presión de vapor (kPa, 20°C)	56.0
Altura Total (m)	84.1
Presión de aspiración (kPa)	100.0
Presión de impulsión (kPa)	110.0
Temperatura de operación (°C)	25.0
Temperatura de diseño (°C)	70.0


#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

Materiales de construcción	AISI 316
Tipología	Centrífuga
Modelo	SIMPLEX-M
Proveedor	Bominox, S.A.
Orientación	Horizontal
Dimensiones (m)	0.567x0.327x0.340
Altura (m)	159.0
Peso (kg)	23.3

#### DATOS DEL MOTOR

Modelo	SIMPLEX-M
Código	SIM-1201
Potencia (kW)	20.0
Velocidad (rpm)	3850



	<b>ESPECIFICACIÓN DE BOMBA</b>	<b>Ítem N°: P-2</b>		<b>Área</b>
		<b>Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico</b>		<b>Proyecto</b>
	<b>Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)</b>		<b>Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero</b>	
	<b>Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú</b>		<b>Hoja: 1</b>	<b>De: 2</b>

#### DATOS GENERALES

Tipificación: Bomba centrífuga

Medios manipulados: Agua para desmineralización

#### DATOS DE DISEÑO

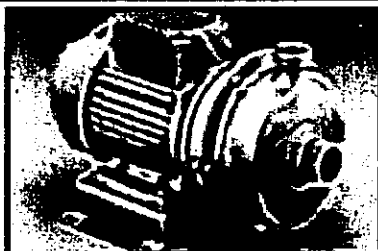
Medio	Agua para desmineralización
Caudal de operación (GPM)	3.7
Viscosidad (cp)	0.98
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1007.3
Presión de vapor (kPa, 20°C)	3.0
Altura Total (m)	5.79
Presión de aspiración (kPa)	96.0
Presión de impulsión (kPa)	110.0
Temperatura de operación (°C)	25.0
Temperatura de diseño (°C)	50.0

#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN


Materiales de construcción	AISI 316
Tipología	Centrífuga
Modelo	SIMPLEX-M
Fabricante	Bominox, S.A.
Orientación	Horizontal
Dimensiones (m)	0.188x0.108x0.112
Altura (m)	11.0
Peso (kg)	7.5

#### DATOS DEL MOTOR

Modelo	SIMPLEX-M
Código	SIM-1201
Potencia (kW)	7.0
Velocidad (rpm)	200





	ESPECIFICACIÓN DE BOMBA	Ítem N°: P-3		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fech
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Agc

#### DATOS GENERALES

Tipificación: Bomba centrífuga

Medios manipulados: Inóculo (Lactobacillus Bulgaricus)

#### DATOS DE DISEÑO

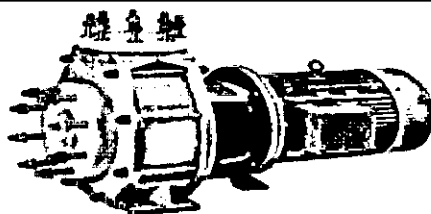
	Inóculo (Lactobacillus Bulgaricus)
Caudal de operación (GPM)	3.10
Viscosidad (cp)	0.80
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1181.0
Presión de vapor (kPa, 20°C)	1.55
Altura Total (m)	2.33
Presión de aspiración (kPa)	100.0
Presión de impulsión (kPa)	110.0
Temperatura de operación (°C)	18.0
Temperatura de diseño (°C)	40.0


#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

Material de construcción	PVDF
	32-195
Motor	NMB
Montaje	ASV Stübbe
Orientación	Horizontal
Dimensiones (m)	0.150x0.080x0.090
Altura (m)	4.4
Peso (kg)	6.1

#### DATOS DEL MOTOR

	NMB
	32-195
Potencia (kW)	6.0
Velocidad (rpm)	100



	<b>ESPECIFICACIÓN DE BOMBA</b>	Ítem N°: P-4		Área
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Proceso
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fechas
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Agosto

#### DATOS GENERALES

Tipificación: Bomba centrífuga

Medios manipulados: Hidróxido de calcio (lechada de cal)

#### DATOS DE DISEÑO

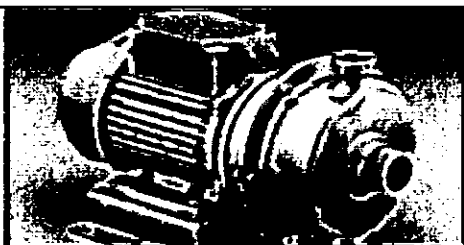
	Hidróxido de calcio (lechada de cal)
Caudal de operación (GPM)	1.0
Viscosidad (cp)	0.26
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2211.0
Presión de vapor (kPa, 20°C)	0.50
Altura Total (m)	0.75
Presión de aspiración (kPa)	100.0
Presión de impulsión (kPa)	120.0
Temperatura de operación (°C)	18.0
Temperatura de diseño (°C)	45.0


#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

Materiales de construcción	AISI 316
Tipología	Centrífuga
Modelo	MINOX-01
Fabricante	Bominox, S.A.
Orientación	Horizontal
Dimensiones (m)	0.200x0.050x0.100
Altura (m)	1.5
Peso (kg)	2.0

#### DATOS DEL MOTOR

Modelo	MINOX-01
Código	M-211
Potencia (kW)	2.0
Velocidad (rpm)	350



	<b>ESPECIFICACIÓN DE BOMBA</b>	Ítem N°: P-5	Ár
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Pro
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero Hoja: 1 De: 2	Fec Ago

#### DATOS GENERALES

minación: Bomba centrífuga

ctos manipulados: Ácido Sulfúrico pureza 98%

#### DATOS DE DISEÑO

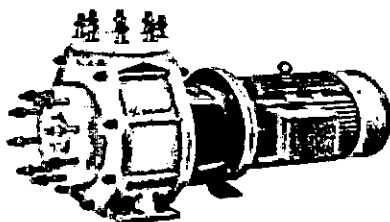
	Ácido Sulfúrico pureza 98%
al de operación (GPM)	100.0
idad (cp)	1.2
dad (kg/m <sup>3</sup> )	1850.0
ón de vapor (kPa, 20°C)	0.138
Total (m)	3.0
ón de aspiración (kPa)	100.0
ón de impulsión (kPa)	250.0
eratura de operación (°C)	18.0
eratura de diseño (°C)	42.0


#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

ial de construcción :	PVDF
	32-195
lo :	NMB
cante :	ASV Stübbe
ón :	Horizontal
nsiones (m)	0.143x0.178x0.136
(m)	6.0
(kg)	20.0

#### DATOS DEL MOTOR

a	NMB
	32-195
cia (kW)	2.0
idad (rpm)	2070



	<b>ESPECIFICACIÓN DE BOMBA</b>	Ítem N°: P-6		Ár
		Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico		Pro
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)	Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero		Fe
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú	Hoja: 1	De: 2	Ag

#### DATOS GENERALES

minación: Bomba centrífuga

ctos manipulados: Alcohol isopropílico

#### DATOS DE DISEÑO

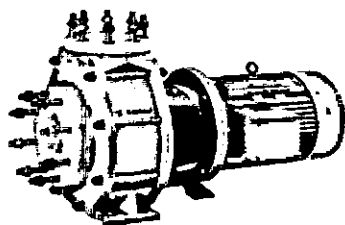
	Alcohol isopropílico
al de operación (GPM)	100.0
sidad (cp)	26.0
dad (kg/m <sup>3</sup> )	785.0
ón de vapor (kPa, 20°C)	50.0
Total (m)	75.0
ón de aspiración (kPa)	100.0
ón de impulsión (kPa)	130.0
eratura de operación (°C)	25.0
eratura de diseño (°C)	80.0


#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

ial de construcción	PVDF
	32-195
lo	NMB
ante	ASV Stübbe
ón	Horizontal
nsiones (m)	0.543x0.280x0.536
(m)	80.0
(kg)	35.0

#### DATOS DEL MOTOR

a	NMB
	32-195
cia (kW)	50.0
idad (rpm)	2500



	<b>ESPECIFICACIÓN DE CALDERA</b>		Ítem N°: CALDER	Área
			Proyecto: Tesis para Título de Ingeniero Químico	Procedimiento
	Planta Química: Producción del Biopolímero Ácido Poliláctico (PLA)		Preparado por: Br. Karina M. Yamunaque Chero	Fechas
	Ubicación de Planta: Cajamarca - Perú		Hoja: 1	De: 2

#### DATOS GENERALES

Finalidad: Caldera para generación de vapor

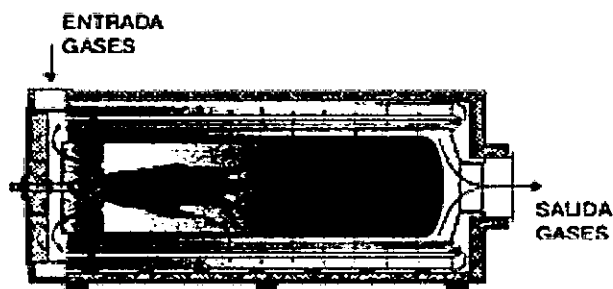
Medios manipulados: Calentamiento de agua

#### DATOS DE DISEÑO

Medio de calefacción:	Agua
Capacidad de operación (kg/h):	3028670.0
Altura (mm):	2500.0
Ancho (mm):	1890.0
Orientación:	Horizontal
Presión de vapor (Psia)	100.0
Temperatura de vapor (°C)	164.0
Energía requerida (KJ/h):	25039568.0
Combustible:	FUEL OIL 18°API
Consumo de combustible (kg/h):	2747.8

#### DATOS DE CONSTRUCCIÓN

Materiales de construcción:	AISI 317-L
Material de aislamiento:	Pirobloc
Material de la caldera:	Acuotubular
Modelo:	GFT-090/1
Consumo de aire (CFM)	9290.0
Capacidad del soplador	50.0
Potencia consumida (kW)	47.25



## **CAPÍTULO VIII**

### **DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA DE PLA**

La distribución de planta es la ordenación de los equipos principales y auxiliares; incluye tanto los espacios necesarios para el movimiento de materiales, almacenamiento, trabajadores directos e indirectos y todas las actividades o servicios. Se utilizó el método de Distribución Sistemática de las instalaciones de la Planta (Systematic Layout Planning), debido a que es la metodología que se utilizará para la planta química de producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) . El diseño y distribución de la planta pueden jugar un papel importante en el buen funcionamiento y operación, además de influir en los costos de operación y de producción; y debe planificarse considerando los problemas futuros que se pueden presentar. Sin embargo una adecuada distribución incluye el acondicionamiento de las áreas de almacenamiento, área de proceso y áreas de producto terminado.

En este capítulo se detallará la distribución de las áreas de la planta química, determinación del área total del terreno utilizando el diagrama de Layout y vista isométrica en 3D para observar al detalle de la distribución de los equipos y áreas del proceso.

#### **8.1 IMPORTANCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTA**

Se busca hallar una ordenación de las áreas de operación, que sea la más económica para el trabajo, al mismo tiempo que sea la más segura y satisfactoria para los trabajadores. Las ventajas de una buena distribución de planta se traducen en reducción del costo de producción, como resultado de alcanzar los beneficios de los siguientes objetivos:

- Reducción del riesgo para la salud
- Aumento de la seguridad de los trabajadores.
- Incremento de la producción.
- Disminución de los retrasos en la producción.
- Ahorro de área ocupada.
- Reducción del manejo de materiales.
- Reducción del material en proceso.
- Acortamiento del tiempo de fabricación.
- Logro de una supervisión más fácil y mejor.
- Disminución del riesgo para el material o su calidad.
- Mayor facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.

## **8.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA QUÍMICA DE PLA**

El factor limitante del tamaño de planta química, es el potencial productivo del biopolímero ácido poliláctico (PLA), pues en base a este es posible determinar el tamaño máximo de la planta para cubrir la demanda existente en el mercado (véase en Capítulo II). De acuerdo al Código Peruano de la Construcción, el área cubierta no debe ser mayor del 60 % del área total del lote y deben dejarse espacios abiertos de los anchos mínimos que se indican: espacio delantero  $7.5 \text{ m}^2$ , espacio lateral  $3 \text{ m}^2$  y espacio posterior  $7.5 \text{ m}^2$ .

El dimensionamiento de la planta química se calculará tomando en cuenta las áreas de recepción de almacenamiento, área de procesos, área de producto terminado y áreas administrativas (laboratorio de control de calidad, almacén, comedor, oficinas, garita, despacho, plataforma de embarque, vestidores y servicios higiénicos). Según la referencia para una capacidad de 30 TM /mes para una planta industrial es necesario un área aproximada de  $393 \text{ m}^2$ , es decir para la capacidad de planta 430 TM/mes para producción del ácido poliláctico (PLA) se obtiene una área cubierta de  $5630.00 \text{ m}^2$  que representa el 60 % del total; es decir el dimensionamiento total del terreno necesario de la planta química es de  $9383.3 \text{ m}^2$  equivalente a 0.94 ha. A continuación se muestra la Tabla 21 correspondiente al dimensionamiento total de la planta química.

## **8.3 DIAGRAMA DE LAYOUT DE LA PLANTA QUÍMICA DE PLA**

El diseño de diagrama de Layout es un esquema de la planta química ácido poliláctico (PLA) que nos permitirá conocer la distribución y ubicación de los equipos considerados en el proceso; para ser entendible, dinámica y atractiva se considerará que las dimensiones del terreno de la planta química es ancho 105.10 m y largo 53.57 m según se muestra en Anexo del Capítulo VIII.

## **8.4 CIMIENTOS Y ESTRUCTURA DE LA PLANTA QUÍMICA DE PLA**

Los tanques de almacenamiento verticales deberán ser localizados de 2.5 a 3 diámetros alejados entre sí, de centro a centro. Las elevaciones mínimas son de 0.9 a 1.5 m desde el fondo al suelo así como los filtros de membranas, para evaporadores de 0.9 a 1.5 m de altura de faldón y para intercambiadores de calor, filtros rotatorios de 0.7 a 1.3 m desde el fondo al suelo. En el área de almacenamiento de materia prima lactosuero se realiza en áreas adyacentes a las unidades de proceso con las bombas de transferencia localizadas a lo largo de esta área. Los tanques de almacenamiento del producto final de PLA, normalmente están alejados del área de proceso.

Los decantadores y filtros rotatorios operan en forma continua a contracorriente se lleva a cabo frecuentemente en diferencia de elevación entre el primero y el subsecuente de acuerdo al arreglo para permitir flujo por gravedad desde uno hacia el siguiente.

La altura mínima de los evaporadores está determinada por los requerimientos de NPSH de la bomba de salida. No es recomendable poner la bomba en una fosa localizada directamente bajo el evaporador para obtener dicho requerimiento. La caldera deberá ser localizada por lo menos 15 m alejado de equipos de proceso peligroso que pudieran ser una fuente fuga de gases.

Los equipos de proceso como los reactores, se deberán localizar tan cerca como sea posible, de manera que las líneas de transferencia sean lo más cortas y sencillas posible; la distancia más cercana son de 6 a 10 m. Los rack de tuberías podrán ser localizados dentro de estas distancias de seguridad. Se deberá proveer un espacio libre entre reactor y reactor; estos espacios deberán ser dos veces su ancho (de centro a centro).

La relación de altura de la columna de las bombas requeridas de NPSH, son determinados por el flujo del fluido. Esta altura varía de 0.9 a 1.5 m para torres con diámetros de 0.6 a 5 m y temperatura de fondos de 100 a 200°C. A temperaturas mayores se puede incrementar esta altura de 0.3 a 0.6 m, para evitar la transmisión de altas temperaturas a la cimentación de concreto o estructura.

Los intercambiadores de doble tubo agrupados deberán estar en fila con los ejes de las boquillas de las canales, en un plano vertical común, para presentar una apariencia estética y para facilitar los detalles de tubería. Los intercambiadores conectados en serie o en paralelo pueden estar situados uno encima del otro hasta alturas de aproximadamente 4 m. Los intercambiadores de calor de casco y tubo en batería a nivel de terreno suelen estar espaciados 0.9 m entre ellos. Normalmente las bombas se localizan tan cerca como sea posible y a nivel de piso de los recipientes de los que succionan.

Generalmente la elevación será gobernada por el tipo de bomba seleccionada, y en relación del servicio y líquido bombeado. En la medida en que sea posible deberá evitarse que las bombas estén localizadas bajo el nivel del piso, ya que esto involucra trabajo civil costoso (por estructuras de soporte involucradas) y problemas de drenaje. Las bombas localizadas en puntos elevados generalmente causarán problemas de vibración en el diseño de estructuras.

Las bombas centrífugas de tipo lata requieren espacio en la parte frontal para remoción de la flecha y para mantenimiento en el impulsor.



**Tabla 21. Dimensionamiento del área cubierta de la Planta Química de PLA**

<b>ÁREAS RESPECTIVAS DE LA PLANTA</b>	<b>SUPERFICIE (m<sup>2</sup>)</b>
Recepción/Almacenamiento	210.13
Procesos	4586.70
Producción	1200.14
Tratamiento /equipos complementarios	3386.56
Área producto terminado	258.00
Administrativo	575.17
Laboratorio	100.00
Almacén	161.97
Oficinas administrativas	172.30
Comedor	63.20
Despacho	16.00
Servicios higiénicos	22.00
Vestidores	16.00
Plataforma embarque	15.70
Garita	8.00
<b>AREA TOTAL CUBIERTA (m<sup>2</sup>)</b>	<b>5630.00</b>

Fuente: Conn, D. y Thompson, D. "Rational Approach to Plan Layout", Chemical Engineering, 28 diciembre (2009)

## 8.5 ARQUITECTURA DE LA PLANTA QUÍMICA DE PLA

En esta representación constituye las vistas isométricas en 3D realizadas en el programa Solid Works respecto a la arquitectura de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) según se muestra en las Figuras 27 y 28.

Figura 27. Arquitectura de la planta química PLA vista de perfil en 3D

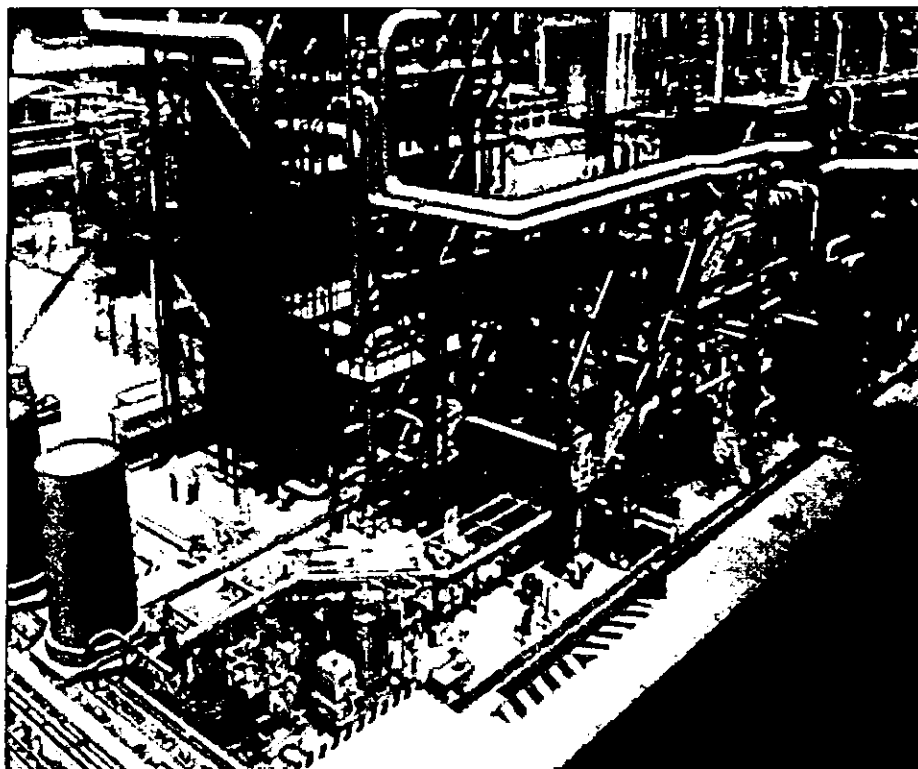
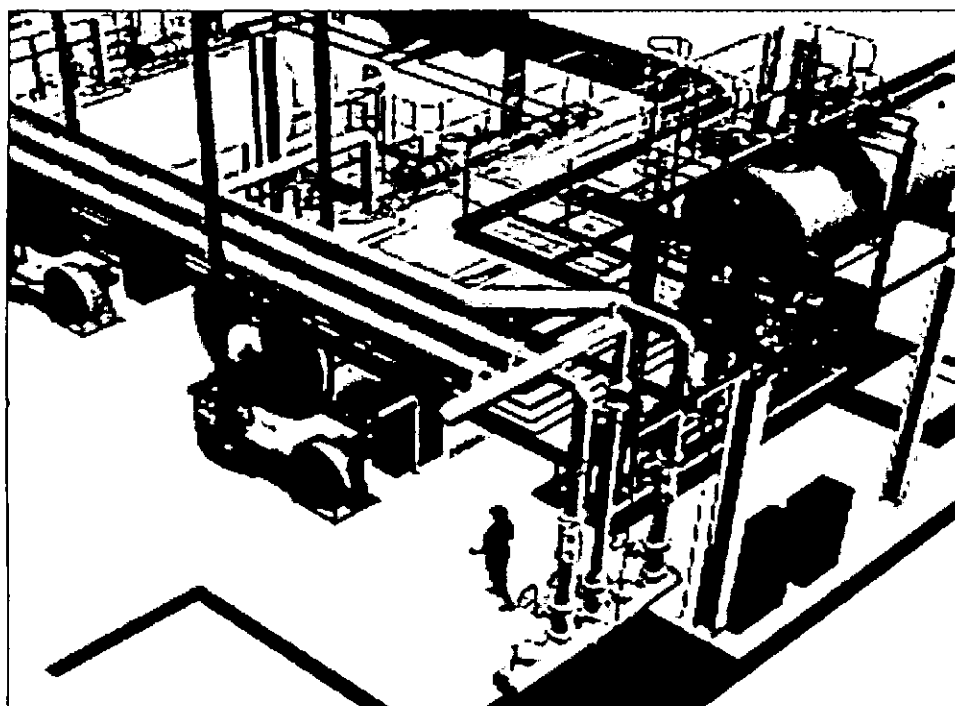


Figura 28. Arquitectura de la planta química PLA vista superior en 3D



## **CAPÍTULO IX**

### **EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL**

En la actualidad existe un deterioro importante del medio ambiente provocado en su mayoría por la acción humana. Esto se debe a los patrones insostenibles de consumo y producción que arrastra la sociedad desde mediados del siglo XX, y donde las industrias juegan un papel muy importante debido a la liberación de sustancias y energías perjudiciales en el aire, el agua y el suelo, provocando la contaminación de la biosfera. Enfrentándose a este deterioro generalizado del medio ambiente, la sociedad está cada vez más sensibilizada sobre la necesidad de conservar el entorno y de reparar el daño causado, así como de garantizar el desarrollo sostenible de las generaciones presentes y futuras.

Para tal objetivo, las normativas y legislaciones públicas referentes a las emisiones gaseosas y vertidos de aguas residuales, así como en consumos de materias primas, son cada vez más restrictivas y evolucionan constantemente hacia la minimización de las emisiones y de mayores rendimientos energéticos, aplicando medidas sancionadoras para todo aquel que no las cumpla. Esta mayor preocupación por parte de las empresas hace que hoy en día la puesta en marcha de un nuevo proyecto, o modificación de los ya existentes, se lleve a cabo usando nuevas herramientas y metodologías de mejora continuada como la ISO, y el uso de métodos de producción más limpia, aunque eso suponga una inversión más elevada que con los métodos tradicionales.

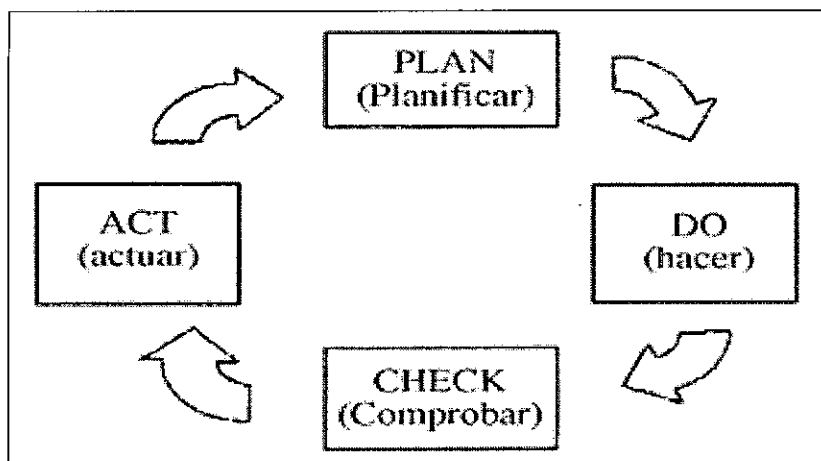
En este capítulo se mostrarán los sistemas de gestión del medio ambiente y evaluación del impacto ambiental de la planta química para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

## 9.1 SISTEMAS DE GESTIÓN

### 9.1.1. Sistema de gestión medioambiental

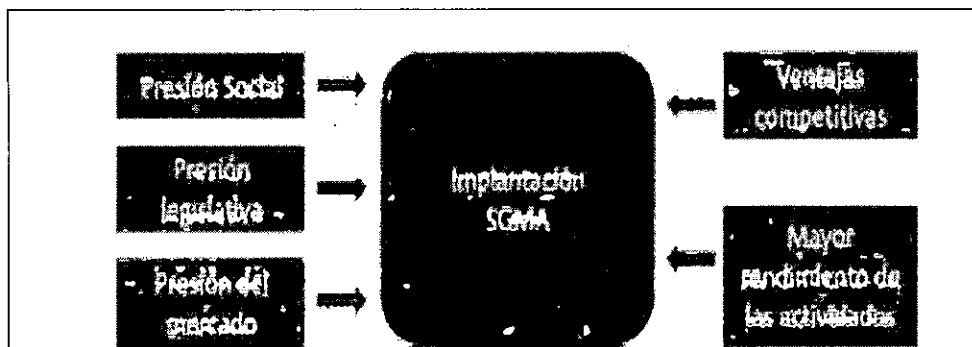
La implementación de un sistema de mejora continua y gestión medioambiental en la planta química para producción de ácido poliláctico (PLA) proporcionará no sólo beneficios al medio ambiente sino que también a la misma empresa, ya que proporciona beneficios económicos representativos debido al no recibir penalizaciones de la administración y a la mejor gestión de todos los recursos. Un sistema de gestión del medio ambiente es una herramienta que permite alcanzar un control de las actuaciones previamente establecidas para la protección del entorno y tiene como objetivo alcanzar la mejora continua de la actuación medioambiental de la organización. El planteamiento de funcionamiento básico se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Esquema básico de un Sistema Gestión Medio Ambiental (SGMA)



La implantación de un SGMA es voluntario, pero cada vez empieza a ser más obligatorio ya que es necesario para garantizar la competitividad de las empresas y para facilitar el cumplimiento de las normativas ambientales, en la Figura 30 se muestra esquemáticamente las influencias externas que obligan a la realización de un SGMA.

Figura 30. Influencias para un Sistema Gestión Medio Ambiental (SGMA)



### **9.1.2. Normativa ISO**

Las normas ISO tienen carácter internacional, y existen variedad de series de certificados según la evaluación. La planta química para producción de ácido poliláctico (PLA) contará con las certificaciones de la ISO 9000 y la ISO 14001, de gestión de calidad y gestión medioambiental, respectivamente.

La ISO 14001, establece cómo implantar un sistema de gestión medioambiental eficaz, la norma se concibe para gestionar el delicado equilibrio entre el mantenimiento de la rentabilidad y la reducción del impacto medioambiental. La aplicación y cumplimiento de la ISO 14001 proporcionará a la planta química una certificación medioambiental tras una auditoria y certificación externa de una empresa calificada y aprobada.

## **9.2 CALIDAD AMBIENTAL**

### **9.2.1. Contaminación atmosférica**

Las emisiones a la atmósfera tienen lugar en forma de gases, vapores, polvos y aerosoles así como de diversas formas de energía, quedando los contaminantes suspendidos en ella y produciendo la degradación del medio ambiente en su conjunto.

Podemos clasificar los contaminantes atmosféricos en dos grandes grupos según su tipo de aparición en la atmósfera:

- Contaminantes primarios: Los contaminantes primarios más destacados son las partículas en suspensión, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, monóxido de carbono, halógenos y sus derivados y los compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Contaminantes secundarios: Son contaminantes secundarios sustancias como el ozono, los aldehídos, las cetonas, los ácidos, sulfatos y nitratos y la contaminación radiactiva a partir de radiaciones ionizantes.

La principal emisión de la planta química contabilizada y emitida a la atmósfera, es la procedente del tanque almacenamiento de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) puede liberar Trióxido de azufre gaseoso ( $\text{SO}_3$ ) o vapor de ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (v) causante también de inflamación del aparato respiratorio superior; pero también emisión de gases proveniente de la caldera como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Pero se realizará su respectivo tratamiento en la planta considerando la utilización de filtros electrostáticos húmedos y lavadores Venturi, para obtener un impacto significativo sobre la composición y calidad del aire por debajo de los límites permitidos por la ley (LMP). Algunas de las leyes vigentes en este aspecto es la siguiente:

➤ Decreto 322/1987, de 23 de Setiembre, de desarrollo de la Ley 22/1983, de 21 de noviembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.

➤ Real Decreto 1073/2002, de 18 de octubre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, Trióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono.

#### **9.2.2. Contaminación acústica**

La ley exige un control y unos límites máximos de decibeles según la zona, y también controla las vibraciones producidas por el funcionamiento de los equipos y las distintas actividades realizadas, controlado tanto el interior como el exterior en las instalaciones de la planta química para producción del ácido poliláctico (PLA). Según la ley 16/2002, de 28 de junio, protección contra la contaminación acústica, esta instalación no puede superar los 60 decibelios en exteriores y los 30 decibelios en interiores. Otra ley referida a la contaminación acústica y vibraciones es la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

#### **9.2.3. Contaminación lumínica**

Para la iluminación de la planta química se requiere 450 A de energía eléctrica para tener una iluminación adecuada. La legislación vigente en este ámbito es Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno y la Ley 3/1998, de 27 de febrero, de la intervención integral de la Administración ambiental.

#### **9.2.4. Contaminación de las aguas residuales**

Se considera contaminación de las aguas residuales en plantas químicas por las modificaciones de propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, que pierden su potabilidad para el consumo diario o su utilización para actividades domésticas, industriales, agrícolas, etc., como asimismo los cambios de temperatura provocados por emisiones de agua caliente (polución térmica). Se establecen niveles de calidad para la evacuación de vertidos en sistemas acuáticos según la normativa de cada zona y la procedencia de éstas.

La principal afectación que se produce en la planta química para producción del ácido poliláctico (PLA) sobre el agua es el cambio del pH valores ácidos procedentes del insumo químico  $H_2SO_4$ . Los contaminantes que pueden alterar el agua en pH básico son los posibles derrames de los insumos químicos utilizados como el hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$  y lactato de calcio  $(C_3H_5O_3)_2Ca$ . Otros también como detergentes y productos de limpieza, así como derrame del iniciador alcohol isopropílico y el catalizador octoato de estaño usados en el proceso de la planta química.

La legislación vigente de este ámbito en el Perú es la Ley 29338 de Recursos Hídricos, establece la autoridad sectorial competente y el control de descargas de aguas residuales al cuerpo receptor fiscalizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

#### 9.2.5. Generación de efluentes en la planta química

Los efluentes contabilizados en la planta química para producción del ácido poliláctico (PLA) se muestran en la Tabla 22:

**Tabla 22. Efluentes generados en la planta química de ácido poliláctico (PLA)**

Compuesto	Cantidad	Procedencia
SO <sub>3</sub> (g) y H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (v)	37.06 m <sup>3</sup> /año	Almacenamiento de ácido sulfúrico
CO <sub>2</sub> (g)	20.36 m <sup>3</sup> /año	Emisión de gases proveniente de la caldera
Aguas residuales con pH ácido	3.75 m <sup>3</sup> /año	Vertimiento del reactor de acidulación
Aguas residuales con pH básico	2.75 m <sup>3</sup> /año	Insumo hidróxido de calcio, lactato de calcio y limpieza de la planta química

Fuente: Elaboración propia

### 9.3 ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL

La evaluación o estudio del impacto ambiental (EIA) es un procedimiento de carácter preventivo para incorporar la variable ambiental en la toma de decisiones sobre determinados proyectos. Su aplicación, basada en el principio de que es mejor prevenir las perturbaciones del origen que combatir después sus efectos, está recomendada por varias organizaciones internacionales como, por ejemplo, las Naciones Unidas (ONU), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Los objetivos fundamentales del EIA para instalar una planta química para producción del ácido poliláctico (PLA) son:

- Describir y analizar el proyecto, dado que se tratará las perturbaciones que generará el impacto ambiental.
- Definir y valorar el medio ambiente donde se instalará la planta química, dado que el objetivo del EIA consiste en minimizar y/o anular las posibles consecuencias ambientales.
- Prever los efectos ambientales generados y evaluarlos para poder juzgar la idoneidad del proyecto, así como permitir, o no, su realización en las mejores condiciones posibles de sostenibilidad ambiental.
- Determinar medidas para minimizar, corregir y compensar los impactos ambientales.

### **9.3.1. Normativa y criterios de aplicación**

La planta de ácido poliláctico pertenece a la industria química, tal como indica la ley será sometida a un régimen de autorización ambiental, que entre otras cosas obliga a realizar un estudio del impacto ambiental. El contenido mínimo de una EIA se completa en la Directiva 85/337/CEE y la Directiva 2008/1/CEE, así como en su transposición a la legislación española en el Real Decreto Legislativo 1/2008 y Real Decreto 143/2003. Dichas normativas sólo son una guía de contenidos mínimos y no existe un criterio único de aplicación o construcción de una EIA.

### **9.3.2. Identificación y minimización de impactos**

Para identificar los impactos medioambientales producidos por la planta de producción de ácido poliláctico (PLA) se puede usar una herramienta llamada Matriz de Identificación de Impactos o Matriz de Leopold, que relaciona cada actividad realizada en la planta con los distintos factores medioambientales de forma cualitativa. Estos factores medioambientales están divididos según el medio al que pertenecen y sus características.

Por lo tanto, el impacto o actividades del proceso productivo se reducen considerablemente, ya que sólo incluye los sistemas de control, motores de agitación y los consumos propios del proceso. Para realizar esta matriz se ha valorado cada actividad por separado, es decir, si una actividad genera un impacto determinado se valora éste, aunque después exista un equipo o medida correctiva que disminuya este impacto, estos resultados son cualitativos.

Estos factores medioambientales están divididos según el medio ambiente al que pertenecen y sus características. Son los siguientes:

- Medio atmosférico: aire y ambiente.
- Medio terrestre: suelo e hidrología superficial.
- Consumo de recursos: renovables y no renovables.
- Paisaje: paisaje urbano.
- Medio socioeconómico: población e infraestructura y servicio.

Con estas apreciaciones y parámetros se realiza la matriz de Leopold según se muestra la Tabla 23.



Tabla 23. Matriz de Leopold

			Uso del suelo	Vegetación	Agua	Edificios	Infraestructura	Actividades recreativas	Actividades industriales	Actividades agrícolas	Actividades ganaderas
Impacto físico	Aire	Composición	X				x	x	x		
		Calidad	X				x	x	x	x	
	Ambiente	Ruido y vibraciones	X	x		x	x		x		
Impacto biológico	Suelo	Composición y calidad		x	x			x	x	x	x
	Hidrología Superficial	Composición y calidad		x	x			x	x	x	x
Impacto de recursos	Renovables	Agua				x	x		x		x
		Envases y embalajes				x			x	x	x
	No renovables	Energía eléctrica				x			x		x
		Combustibles fósiles	X	x			x		x		
Impacto paisajístico	Paisaje Urbano	Afectación al paisaje	X	x	x		x	x			
Impacto socioeconómico	Población	Calidad de vida					x	x			
		Ocupación	X	x	x	x	x	x	x	x	x
	Infraestructuras y servicios	Caminos y Carreteras	X								

Fuente: Elaboración propia

Para observar más detalladamente cuales son las actividades que producen más impacto medioambiental, y poder realizar las acciones correctivas pertinentes se realiza el cálculo de pesos ponderados. A partir de la matriz de Leopold y mediante la expresión numérica, que se deriva de uso de la siguiente ecuación, se calcula el valor del impacto cada en cada actividad y se construye la tabla de pesos ponderados según la siguiente ecuación:

$$\text{Importancia del impacto} = \pm [3 \cdot \text{IN} + \text{AC} + 2 \cdot \text{SI} + \text{TE} + 2 \cdot \text{RV} + 2 \cdot \text{MC} + \text{PR}]$$

La importancia del impacto tendrá un valor positivo o negativo según el carácter del impacto. Los valores numéricos y definiciones de los efectos se exponen a continuación:

- **Carácter (±):**
  - **Positivo:** Genera efectos beneficiosos (1).
  - **Negativo:** Manifiesta pérdida de valores naturales del medio ambiente (-1).
- **Efecto (IN):**
  - **Directo:** Aquél que se provoca directamente alterando el medio ambiente (5).
  - **Indirecto:** Aquél que se desencadena por independencia del medio respecto a la situación de la acción (1).
- **Intensidad (AC):**
  - **Mínima:** El que se produce alterando de manera muy mínima el medio ambiente (1).
  - **Media:** El que se produce alterando de manera media en el medio ambiente (2.5).
  - **Notable:** El que se produce en forma de alteración importante del medio ambiente (5).
- **Sinergia (SI):**
  - **Simple (Sm):** Aquel que se manifiesta en un solo componente ambiental (1).
  - **Acumulativa (A):** Aquel que se manifiesta de forma progresiva y en orden creciente (5).
  - **Sinérgica (Sn):** Que produce unas alteraciones que inducen a otros y se acumulan (3).
- **Temporalidad (TE):**
  - **Corto plazo (C):** Tiempo de un año (5).
  - **Medio plazo (M):** Menos de cinco años (3).
  - **Largo plazo (L):** A partir de cinco años (1).
- **Reversibilidad (RV):**
  - **Reversible (R):** Cuando las condiciones iniciales se restablecen pasado un tiempo (1).
  - **Irreversible (I):** Cuando no hay posibilidad de restablecer las condiciones iniciales (5).
- **Recuperable (MC):**
  - **Recuperable (Rc):** Cuando se pueden realizar medidas correctoras o que minimizan o anulan el efecto del impacto (1).
  - **Irrecuperable (Ic):** Cuando no hay posibilidad de recuperación (5).
- **Aparición (PR):**
  - **Irregular (Ir):** Cuando es impredecible situar en el tiempo (1).
  - **Periódico (Pr):** Cuando supone alteraciones reiteradas e intermitentes (2.5).
  - **Continuo (Cn):** Cuando supone alteraciones en el medio ambiente de manera perpetua en el tiempo (2.5).
  - **Discreto (Ds):** cuando supone una alteración que después de un tiempo desaparece (1).

A partir de la ecuación anterior y asociando estos valores a cada impacto se construye la Tabla 24, utilizando dicha tabla se construye la matriz de pesos ponderados o matriz de importancia que expone de forma clara la relación de cada actividad y el impacto que ésta provoca en valores numéricos.

Tabla 24. Cálculo de impacto ambiental con promedio ponderados

			Transporte de materias primas y productos	Recepción y descarga	Almacenaje	Proceso productivo	Cátedra	Tratamiento efluentes residuales	Mantenimiento	Laboratorio	Gestión administrativa y servicios
Medio atmosférico	Aire	Composición	-17.5				-45.5	-29.0	-29.0		
		Calidad	-17.5					-29.0	-29.0	-13.0	
	Ambiente	Ruido y vibraciones	-29.5	-33.5		-44.0	-33.5		-13.0		
Medio terrestre	Suelo	Composición y calidad		-47.5	-17.5				-29.0	-13.0	-13.0
	Hidrología Superficial	Composición y calidad		-39.5	-16.0				-29.0	-13.0	-13.0
Medio de recursos	Renovables	Agua							-29.0		-31.0
		Envases y embalajes				-16.0			-30.5	-33.5	-38.0
	No renovables	Energía eléctrica							-46.5		-34.0
		Combustibles fósiles		-37.5					-46.5		
Paisaje	Paisaje Urbano	Afectación al paisaje	-18.0	-37.5			-17.5	-29.0			
Medio económico	Población	Calidad de vida					-16.0	-13.0			
		Ocupación	+31.5	+31.5	+31.5	+31.5	+31.5	+31.5	+31.5	+29.5	+31.0
	Infraestructuras y servicios	Caminos y Carretas	-48.0								
Efecto compatible: Importancia de impacto < 24.0							Efecto moderado: Importancia de impacto < 36.0				
Efecto severo: Importancia de impacto < 48.0											

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los puntos más críticos se concentran en el consumo de recursos, en la calidad del medio atmosférico y la composición del medio terrestre.

### **9.3.3. Medidas correctivas**

#### **9.3.3.1. Medio atmosférico**

El principal impacto crítico que encontramos en este medio es la emisión de gases producida por la caldera y del almacenamiento de ácido sulfúrico. Esto se corrige mediante un buen mantenimiento y la incorporación de filtros electrostáticos húmedos y lavadores Venturi. Con la contaminación acústica producida debida al ruido, la solución es aislar acústicamente las zonas más ruidosas. Aunque cabe decir que al tratarse de una zona industrializada, el impacto producido es mínimo.

#### **9.3.3.2. Medio terrestre**

Los impactos críticos que encontramos en este medio son las posibles fugas y derrames de distintos insumos químicos que se manipulan en la planta, que pueden filtrarse al subsuelo o al alcantarillado sanitario. Para prevenir estos focos de contaminación se construyen barreras físicas para contener los posibles derrames o desbordes de los tanques, así como una red propia de alcantarillado. También un buen mantenimiento de las válvulas y el rack de tuberías evitarán la pérdida de producto.

#### **9.3.3.3. Consumo de recursos**

El consumo de recursos en la industria es elevado por necesidad. La única manera de reducir estos consumos es aumentar el rendimiento energético de los equipos, así como la minimización y reaprovechamiento del consumo del agua en la planta química. Para aumentar los rendimientos energéticos y de consumos de materia es necesaria la inversión en nuevas técnicas de producción y equipos más modernos, y hacer un buen mantenimiento de las instalaciones y equipos.

#### **9.3.3.4. Paisaje**

Al tratarse de una zona industrializada el impacto en el paisaje es mínimo. Los tanques de almacenamiento provocan el mayor impacto visual al estar situados en el exterior y por tener un tamaño destacado, pero resulta imposible sustituirlos o variar su diseño por motivos de seguridad. Para reducir este impacto se puede construir zonas ajardinadas en las instalaciones y mantener las instalaciones limpias y en buen estado.

#### **9.3.3.5. Medio socioeconómico**

La planta proporciona empleo a personas de la zona, esto influye positivamente al nivel socioeconómico y provoca aceptación en la sociedad. El efecto provocado en los caminos y carreteras de la zona es mínimo debido al gran volumen de vehículos que circulan en la zona y la proximidad de ciudades aledañas.

## **CAPÍTULO X**

### **EVALUACIÓN ECONÓMICA**

En este capítulo se evaluará de forma detallada las diferentes variables e índices económicos necesarios para determinar la rentabilidad del proyecto para la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

Los precios y costos de los diferentes equipos, materiales y otros rubros serán actualizados al año 2014, se usará como moneda el dólar americano.

Para calcular el precio de los equipos y maquinarias de proceso de la planta, se utilizará un software especializado suministrado por CAPCOST, que proporciona en forma estimada los costos y optimizaciones de los servicios de ingeniería para la industria química, agroindustriales y metalúrgicas. Además se usarán catálogos de maquinarias y equipos industriales para el cálculo de los precios unitarios requeridos para la evaluación económica.

#### **10.1 ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN TOTAL:**

Para evaluar la rentabilidad económica del proyecto se debe determinar la inversión de capital para construir la planta química y la inversión necesaria para poner en marcha el proyecto. La inversión total se puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Inversión Total} = \text{Inversión del Capital} + \text{Capital Puesta en Marcha} + \text{Intereses}$$

El interés es opcional siempre y cuando que la inversión de capital y el capital de la puesta en marcha sean obtenidos de una entidad bancaria.

#### **10.2 ESTIMACIÓN DE INVERSIÓN DEL CAPITAL:**

Al ponerse en marcha la planta química para la producción del ácido poliláctico (PLA), se invierte un gran capital para adquirir e instalar los equipos y maquinarias necesarias para el proceso, donde se instalará y se construirá el proyecto, con sus respectivos instrumentos de controles, tubería y servicios auxiliares. La inversión de capital fijo (FCI) es la inversión para adquirir e instalar los equipos necesarios en el proceso. El capital de trabajo para una planta química está formado por la cantidad total de dinero invertido en: materias primas, reactivos químicos y abastecimientos que se mantiene en almacenamiento, productos terminados y subproductos que se encuentran en proceso de producción, cuentas por cobrar, dinero en efectivo para el pago mensual de los gastos operativos, cuentas a pagar e impuestos a pagar. La inversión de capital se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Inversión Capital} = \text{Inversión de Capital Fijo (FCI)} + \text{Capital de Operación (trabajo)}$$

El método de porcentajes requiere la determinación del costo de los equipos entregados. Los rubros del costo directo de la planta química se estiman como porcentajes del costo de los equipos entregados. Los componentes adicionales de la inversión de capital se basan en porcentajes promedios del costo directo total de la planta. El método puede resumirse mediante la siguiente ecuación del costo (Peters and Timmerhaus):

$$C_n = [ \sum E + \sum ( f_1 E + f_2 E + \dots + f_n E ) ] (1 + f_i )$$

Dónde:  $f_1, f_2, \dots$  = son los porcentajes o factores de los diversos rubros.

$f_i$  = factor de los costos indirectos.

E = costo del equipo entregado.

### 10.2.1 Estimación de equipos adquiridos del proceso:

Para estimar el costo de los equipos necesarios para la producción del ácido poliláctico (PLA) en la planta química se tomará como referencia los precios del mercado internacional. Esta estimación es de vital importancia ya que los demás rubros se basan en porcentajes estimados de acuerdo con Peters and Timmerhaus. Actualmente existen catálogos de equipos estandarizados lo que permite estimar de manera exacta los precios en la actualidad. El costo de los equipos incluyen accesorios como instrumentos de control automático, el aislamiento en el caso de los equipos de alta transferencia de calor, como evaporadores, intercambiadores de calor, caldero. De acuerdo al software especializado CAPCOST, los precios de los equipos están actualizados hasta el 2009 para actualizar los costos al 2014 se usaran los índices económicos CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index). Se detallará a continuación en la Tabla 25:

Tabla 25. ÍNDICE CHEMICAL ENGINEERING PLANT (CEPCI)	
AÑO	ÍNDICE
2001	393.3
2002	395.6
2003	402.0
2004	444.2
2005	468.2
2006	499.6
2007	525.4
2008	575.4
2009	521.9
2010	550.8
2011	585.7
2012	601.7

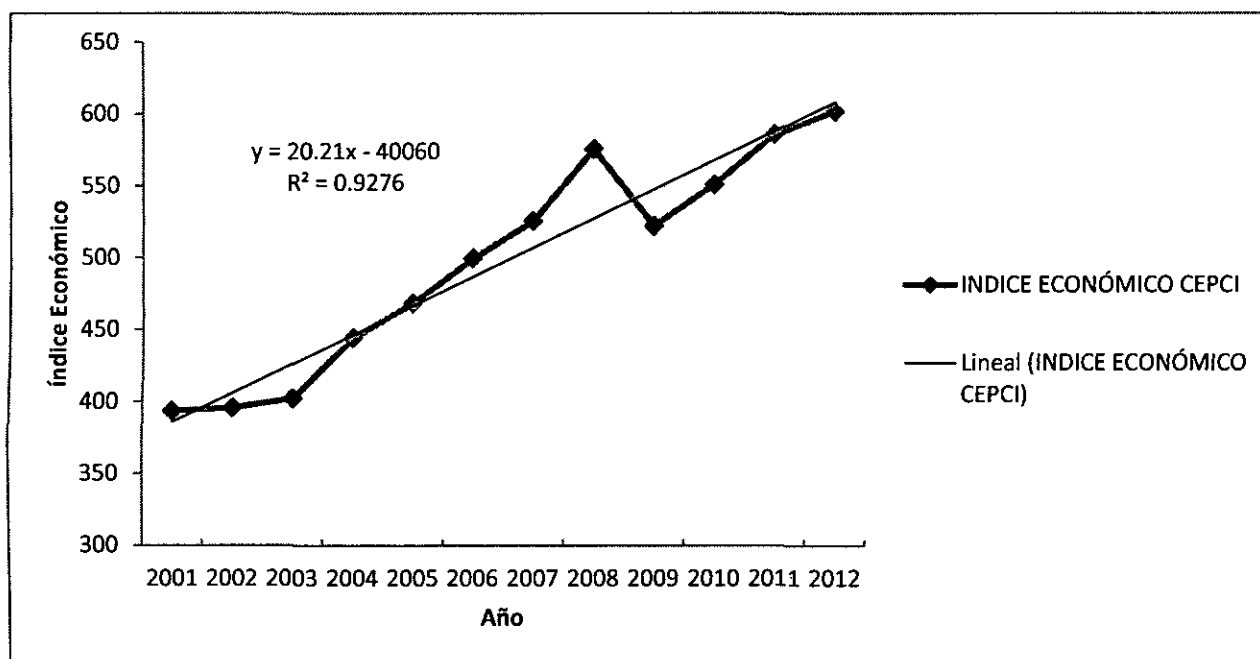
Fuente: Chemical Engineering Plant Cost Index

Para este proyecto se usará el índice CEPCI, ya que este se basa en los costos de construcción de plantas químicas según se muestra en el Gráfico 23. La fórmula para actualizar los precios usando los índices económicos es la siguiente:

$$\text{Costo Equipo}_n = \text{Costo Equipo}_N * \frac{\text{Índice}_n}{\text{Índice}_N}$$

Donde: N y n es el año

**Gráfico 23. Tendencia del índice económico CEPCI**



Fuente: Elaboración propia

Estimando el índice CEPCI al 2014:

$$\text{Índice}_{2014} = 20.21 * 2014 - 40060 = 642.9$$

Se puede estimar entonces los costos de los equipos al año 2014 basándonos en los costos del 2009. Por ejemplo:

Costo tanque almacenamiento del lactosuero (2009)= \$50000.00, Índice 2009 = 521.9, Índice 2014 = 642.9

$$\text{Costo Tanque}_{2014} = \$50000.00 * \frac{642.9}{521.9} = \$61592.26$$

Los costos actuales de los equipos se detallan en las Tablas 26 y 27:

**TABLA 26. PRECIO DE EQUIPOS PRINCIPALES DEL PROCESO QUÍMICO DE PLA**

EQUIPO	CÓDIGO	CANTIDAD	PRECIO UNIT. 2014	PRECIO POR EQUIPO
REACTOR FERMENTADOR-NEUTRALIZADOR	RX-FERNEU/D-01	3	\$100000.00	\$300000.00
REACTOR DE ACIDULACIÓN	RX-ACID/G	1	\$30000.00	\$30000.00
REACTOR DE PREPOLIMERIZACIÓN	RX-PREPOLIM/I	1	\$55433.00	\$55433.00
REACTOR DE POLIMERIZACIÓN	RX-POLIM/K	1	\$80070.00	\$80070.00
EVAPORADOR CONCENTRACIÓN DE LACTATO DE CALCIO	EVAP1/F-01	1	\$58000.00	\$58000.00
EVAPORADOR CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO	EVAP2/F-02	1	\$60000.00	\$60000.00
PREFILTRADO	PREF/A	1	\$3500.00	\$3500.00
CENTRIFUGADO	CENTRIF/B	1	\$2800.00	\$2800.00
ULTRAFILTRADO-DIAFILTRADO	DUF/C	1	\$6160.00	\$6160.00
FILTRO ROTATORIO I	FROT1/E-01	1	\$4000.00	\$4000.00
FILTRO ROTATORIO II	FROT2/E-02	1	\$4000.00	\$4000.00
DECANTADOR I	DEC1/H-01	1	\$2500.00	\$2500.00
DECANTADOR II	DEC2/H-02	1	\$2500.00	\$2500.00
EQUIPO RECIRCULACIÓN I	RECIR-1	1	\$2000.00	\$2000.00
EQUIPO RECIRCULACIÓN II	RECIR-2	1	\$2000.00	\$2000.00
<b>SUBTOTAL EQUIPOS PRINCIPALES</b>				<b>\$612963.00</b>

Fuente: Elaboración propia basado en el Software CAPCOST e Índice Económico CEPCI

**TABLA 27. PRECIO DE EQUIPOS AUXILIARES DEL PROCESO QUÍMICO DE PLA**

EQUIPO	CÓDIGO	CANTIDAD	PRECIO UNIT. 2014	PRECIO POR EQUIPO
TANQUE DE ALMACENAMIENTO MATERIA PRIMA LACTOSUERO	TK-01	1	\$61592.26	\$61592.26
TANQUE DE ALMACENAMIENTO AGUA	TK-02	6	\$11000.00	\$66000.00
TANQUE DE ALMACENAMIENTO INÓCULO	TK-03	1	\$20000.00	\$20000.00
TANQUE DE ALMACENAMIENTO HIDRÓXIDO DE CALCIO	TK-04	1	\$18000.00	\$18000.00
TANQUE DE ALMACENAMIENTO ÁCIDO SULFÚRICO	TK-05	2	\$43000.00	\$86000.00
TANQUE DE ALMACENAMIENTO INICIADOR ALCOHOL ISOPROPÍLICO	TK-06	1	\$30796.13	\$30796.13
TANQUE DE ALMACENAMIENTO CATALIZADOR OCTOATO DE ESTAÑO	TK-07	1	\$40000.00	\$40000.00
TANQUE DE ALMACENAMIENTO PRODUCTO BIOPOLÍMERO ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)	TK-08	1	\$55592.00	\$55592.00
INTERCAMBIADOR DE CALOR CASCO Y TUBO	EX-01	1	\$11086.61	\$11086.61
INTERCAMBIADOR DE CALOR DOBLE Y TUBO	EX-02	1	\$15000.00	\$15000.00
BOMBA PARA MATERIA PRIMA LACTOSUERO	P-01	1	\$4500.00	\$4500.00
BOMBA PARA AGUA	P-02	6	\$2800.00	\$16800.00
BOMBA PARA INÓCULO	P-03	1	\$8622.92	\$8622.92
BOMBA PARA HIDRÓXIDO DE CALCIO	P-04	1	\$5543.30	\$5543.30
BOMBA PARA ÁCIDO SULFÚRICO	P-05	2	\$7000.00	\$14000.00
BOMBA PARA ALCOHOL ISOPROPÍLICO	P-06	1	\$2956.43	\$2956.43
<b>SUBTOTAL EQUIPOS AUXILIARES</b>				<b>\$ 456489.65</b>
<b>TOTAL COSTO DE EQUIPOS ADQUIRIDOS</b>				<b>\$1'069452.65</b>



El costo por equipos adquiridos asciende a \$1'069452.65. Para la estimación de la inversión del capital, se basa en el costo de los equipos adquiridos de acuerdo con los porcentajes se estiman los costos según la Tabla correspondiente del Anexo Capítulo X.

### 10.2.2 Capital de puesta en marcha:

Ente la etapa de construcción y el periodo de complementación son muy frecuentes las modificaciones debido a que la planta debe operar en las condiciones establecidas según el diseño. Estas modificaciones suponen gastos en materiales y equipos que producen pérdidas de ingresos mientras la planta química se encuentre en parada o no trabaje a capacidad máxima. En general resulta satisfactorio y conveniente considerar el 10% de las inversiones de capital fijo para este rubro entonces:

$$\text{Capital Puesta en Marcha} = 10.00\% \cdot \text{FCI}$$

$$\text{Capital Puesta en Marcha} = 0.10 \cdot 4'513624.91 = \$451362.49$$

### 10.2.3 Intereses:

Los intereses son el rédito que hay que pagar por el uso del dinero obtenido. El tiempo que lleva en la fase de construcción y puesta en marcha se asumirá en 30 meses y la tasa de interés promedio anual será de 12% en dólares. El cálculo de los intereses mensuales se puede calcular mediante la siguiente fórmula:  $\text{Intereses} = P [(1+i)^n - 1]$

Donde:

P: monto actual

i: interés anual

N: periodo

Entonces:

$$P = 5'433354.19 + 451362.49 = \$5'884716.78$$

$$n = 30 \text{ meses} \cdot 1 \text{ año} / (12 \text{ meses}) = 2.5 \text{ años}$$

Reemplazando:

$$\text{Intereses} = 5'884716.78 [(1+0.12)^{2.5} - 1] = \$1'927434.10$$

## 10.3 CÁLCULO DE INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO:

La inversión total del proyecto en instalación de la planta química para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) se detalla en la siguiente Tabla 28:

TABLA 28. ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO EN LA PLANTA QUÍMICA PARA PRODUCCIÓN DEL PLA	
INVERSIÓN DEL CAPITAL	\$5'433354.19
CAPITAL PUESTA EN MARCHA	\$451362.49
INTERESES	\$1'927434.10
<b>TOTAL DE INVERSIÓN</b>	<b>\$7'812150.78</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 10.4 COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN:

Este costo es de vital importancia ya que determina los costos fijos y variables de la planta química en función del producto ácido poliláctico (PLA), se puede resumir de la siguiente manera:

$$\text{COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN} = \text{COSTO DE MANUFACTURA} + \text{GASTOS GENERALES}$$

El costo total de producción se calcula tomando como base el costo por día, por unidad del producto o en base al costo anual. La mejor fuente de informaciones para una estimación del costo total de producción la constituyen los datos de proyectos similares; sin embargo, a falta de esta información se disponen de estimaciones porcentuales de acuerdo a los elementos que la componen.

##### 10.4.1 Materia prima e insumos químicos (Cost Raw Material):

Es el costo de la materia prima lactosuero y reactivos químicos usados en el proceso, se detallan en la siguiente Tabla 29:

TABLA 29. COSTOS MATERIA PRIMA Y REACTIVOS QUÍMICOS (CRM)			
MATERIA PRIMA /REACTIVOS QUÍMICOS	CONSUMO ANUAL	PRECIO UNIT. 2014	TOTAL
Lactosuero	197542.80 TM/año	\$0.05/TM	\$9877.14
Ácido sulfúrico	12771.54 TM/año	\$250/TM	\$3'192885.00
Hidróxido de calcio	3991.86 TM/año	\$200/TM	\$798372.00
Inóculo ( <i>Lactobacillus Bulgaricus</i> )	6657.92 TM/año	\$30/TM	\$199737.60
Catalizador octoato de estaño	6881.44 TM/año	\$1000/TM	\$6'881440.00
Iniciador alcohol isopropílico	144502.12 TM/año	\$50/TM	\$7'225106.00
TOTAL ANUAL CRM			\$18'307417.74

Fuente: Elaboración propia a partir de [www.icis.com/chemicals](http://www.icis.com/chemicals)

##### 10.4.2 Tratamiento de residuos (Cost Waste Treatment):

Es el costo por el tratamiento de los efluentes generados en la planta química por emisiones gaseosas y vertimiento de aguas residuales, de acuerdo a valores obtenidos en plantas químicas similares, el costo total se detallan en la siguiente Tabla 30:

TABLA 30. COSTO DEL TRATAMIENTO DE EFLUENTES EN PLANTA QUÍMICA (CWT)			
EFLUENTES GENERADOS	CANTIDAD ANUAL	PRECIO	TOTAL
Emisión de gases y vapores: $\text{SO}_3$ (g), $\text{H}_2\text{SO}_4$ (v) y $\text{CO}_2$ (g)	0.18 TM/año	\$5000/TM	\$18000.00
Vertimiento de aguas residuales	5.50 TM/año	12000 \$/TM	\$6600.00
TOTAL CWT			\$24600.00

Fuente: Elaboración propia a partir de [www.icis.com/chemicals](http://www.icis.com/chemicals)

##### 10.4.3 Mano de obra (Cost Operation Labor):

Para determinar el costo de la mano de obra se necesita saber la cantidad de operadores técnicos necesarios en la planta química, según se muestra la Tabla 31.

La planta química para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) opera en tres turnos, equivalente a 8000 horas al año.

Número total de operadores =  $12 * 3 = 36$

$$36 \text{ hombres} * 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 864 \frac{\text{horas} * \text{hombres}}{\text{día}}$$

TABLA 31. NÚMERO DE OPERADORES EN PLANTA QUÍMICA			
UNIDADES DE PROCESO	N° EQUIPOS	N° OPERADORES	TOTAL
REACTORES	4	0.5	2
EVAPORADORES	2	0.5	1
PREFILTRADO/ULTRAFILTRADO-DIAFILTRADO	2	0.5	1
CENTRIFUGADO	1	1	1
FILTROS ROTATORIOS	1	1	1
DECANTADORES	2	0.5	1
EQUIPO DE RECIRCULACIÓN	2	0.5	1
TANQUES DE ALMACENAMIENTO	8	0.25	1
INTERCAMBIADORES DE CALOR	2	0.5	1
BOMBAS	6	0.5	3
NÚMERO DE OPERADORES TOTAL			12

Fuente: Elaboración propia

El costo anual de la planilla de operadores en la planta química se detalla en la siguiente Tabla 32; en lo cual los costos adicionales se refieren a pagos de CTS, utilidades, seguros de salud y bonificaciones por derecho del Ministerio de Trabajo.

TABLA 32. COSTO DE MANO DE OBRA EN PLANTA QUÍMICA (COL)				
RUBRO	N° OPERADORES	REMUNERACION BASICA ANUAL	ADICIONALES	TOTAL
OPERADORES	36	\$4000.00	30%	\$187200.00

Fuente: Elaboración propia

#### 10.4.4 Servicios (Cost Utility): Según se muestra la Tabla 33:

TABLA 33. COSTO DE SERVICIOS EN PLANTA QUÍMICA (CUT)			
SERVICIOS	CONSUMO ANUAL	PRECIO UNIT.	TOTAL
ELECTRICIDAD	2500000 kw/año	\$0.15/kw	\$375000.00
COMBUSTIBLE	85000000 kg/año	\$0.018/kg	\$1'530000.00
AGUA	26652 m <sup>3</sup> /año	\$1.50/m <sup>3</sup>	\$39978.00
VAPOR DE AGUA	3028670 kg/año	\$0.005/kg	\$15143.35
TOTAL ANUAL CUT			\$1'960121.35

Fuente: Elaboración propia

#### 10.4.4 Determinación del Costo Total de Producción:

Con estos cuatro factores se puede determinar mediante las estimaciones realizadas de plantas similares de procesos químicos el costo total de producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) en la planta química en la cual asciende a \$23'420111.72 según se muestra en la Tabla correspondiente del Anexo Capítulo X.

De acuerdo con esta tabla, se puede determinar los costos fijos y variables de la planta, teniendo en cuenta que los costos fijos no dependen de la producción al contrario de los costos variables que si dependen de la producción:

$$\text{Costo total (Ct)} = \text{Costo fijos (Cf)} + \text{Costos Variables (Cv)}$$

$$\text{Costos Fijos (Cf)} = \$889328.98$$

$$\text{Costos variables (Cv)} = \$22'530782.74$$

#### 10.5 INDICADORES FINANCIEROS:

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto en la instalación de una planta química para la producción del ácido poliláctico (PLA) es necesario calcular los indicadores principales:

##### 10.5.1 Punto de equilibrio:

El punto de equilibrio (break even point), es la herramienta más sencilla para evaluar la rentabilidad del proyecto, se define como el punto donde el nivel de las utilidades igual a cero, es decir el punto donde no se pierde ni se gana. La gran desventaja de este método es que no toma en cuenta la inversión total. La expresión matemática del punto de equilibrio es la siguiente:

$$P_{eq} = \frac{\text{Costos fijos}}{1 - \frac{\text{Costos variables}}{\text{Ingresos Totales}}}$$

Con respecto a los ingresos totales se calculará mediante la venta actual del producto ácido poliláctico PLA y subproductos obtenidos en el proceso, los cuales: son el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) utilizado como yeso agrícola en los campos de cultivo obteniéndose a partir del 30% de producción y lactato de calcio  $(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}$  importante como conservante alimentario:

$$I_{\text{venta PLA}} = 158032.6 \frac{\text{TM}}{\text{año}} * 30\% * 523.4 \frac{\$}{\text{TM}} = \$24'814278.85/\text{año}$$

$$I_{\text{venta CaSO}_4} = 96005.6 \frac{\text{TM}}{\text{año}} * 200.0 \frac{\$}{\text{TM}} = \$1'920112.00/\text{año}$$

$$I_{\text{venta } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}} = 9044.20 \frac{\text{TM}}{\text{año}} * 50.0 \frac{\$}{\text{TM}} = \$452210.00/\text{año}$$

$$I_{\text{TOTAL}} = \$27'186600.85/\text{año}$$

Reemplazando en la ecuación:

$$P_{eq} = \frac{889328.98}{1 - \frac{22530782.74}{27'186600.85}} = \$5'193036.20/\text{año}$$

Quiere decir que se necesita vender más de \$5'193036.20/año para obtener utilidades favorables. El punto de equilibrio también puede relacionarse con el volumen y porcentaje de producción según se muestra en Gráfico correspondiente del Anexo Capítulo X:

$$P_{eq|TM} = \frac{\$5'193036.20}{\$523.4/TM} = 9921.73 \text{ TM}$$

$$P_{eq|\%} = \frac{9921.73 \text{ TM}}{15803.26 * 0.30 \text{ TM}} * 100\% = 21.0\%$$

### 10.5.2 Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR):

Es la tasa porcentual en la cual la inversión del proyecto tiene una cantidad aceptable de rendimiento. El cálculo de la TMAR es la siguiente:

$$TMAR = i + f + i*f$$

Donde: i es la inflación y f es el premio al riesgo

El porcentaje esperado para la inversión del proyecto se calcula tomando en cuenta la inflación promedio anual (4.00% tomado hasta junio 2013 Banco Central de Reserva del Perú BCRP); además de la inflación se considera un premio al riesgo que corre el inversionista (que por lo general se considera entre 3% a 4%). La TMAR del banco será de 20% (tomando en cuenta porcentajes similares en otros proyectos de inversión):

$$TMAR_{proyecto} = i + f + i*f = 0.04 + 0.04 + 0.04*0.04 = 0.0816$$

Suponiendo que los inversionistas aporten el 70% de la inversión total y el banco financia el resto, se determina la  $TMAR_{mixta}$

$$TMAR_{mixta} = 0.3*0.2 + 0.7*0.0816 \approx 12.0\%$$

### 10.5.3 Valor actual neto (VAN):

El VAN es el valor monetario neto a restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. Esto equivale a comparar todas las ganancias esperadas con todos los desembolsos necesarios para producir esas ganancias en términos de su valor equivalente en este momento o tiempo cero. Es claro entonces que para aceptar un proyecto las ganancias deberán ser mayores que los desembolsos, lo cual dará por resultado que el VAN se utiliza el costo de capital o TMAR y su valor depende la rentabilidad del proyecto.

$VAN > 0$ ; el proyecto es aceptable.

$VAN = 0$ ; el proyecto es marginal.

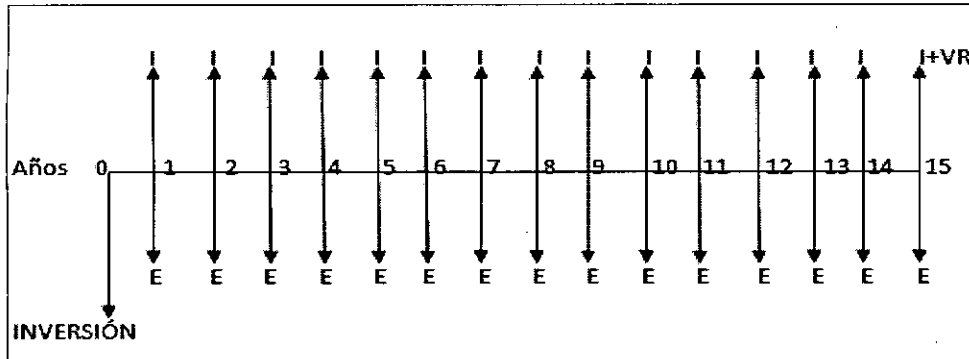
$VAN < 0$ ; el proyecto es inaceptable.

El VAN se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VAN = \text{INGRESO}|_{\text{AÑO CERO}} - \text{EGRESOS}|_{\text{AÑO CERO}}$$

Se puede esquematizar de la siguiente manera en el Gráfico 24:

**Gráfico 24. Esquema de inversión del proyecto en la línea del tiempo**



Fuente: Elaboración propia

El VAN del proyecto se determina a partir de los siguientes datos:

Inversión = \$7'812150.78

Ingresos = \$27'186600.85

Egresos = \$23'420111.72

Valor rescate = 5% \* Inversión = \$ 390607.54

TMAR = 12%

Tiempo de vida del proyecto = 15 años

Utilidades brutas = Ingresos – Egresos = 27'186600.85 – 23'420111.72 = \$3'766489.13

Reemplazando en la fórmula:

$$VAN = -7'812150.78 + 3'766489.13 * \left[ \frac{(1 + 0.12)^{15} - 1}{0.12 * (1 + 0.12)^{15}} \right] + \frac{390607.54}{(1 + 0.12)^{15}}$$

Se determina que el VAN es \$17'840896.29, es decir el proyecto es rentable.

#### 10.5.4 Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR es la tasa de descuento por la cual el VAN es igual a cero. Con el criterio de aceptación que emplea el TIR, si esta es mayor que la TMAR el proyecto es rentable. El cálculo del TIR es el siguiente:

$$VAN = 0 = -7'812150.78 + 3'766489.13 * \left[ \frac{(1 + i)^{15} - 1}{i * (1 + i)^{15}} \right] + \frac{390607.54}{(1 + i)^{15}}$$

$i = 0.48$

TIR= 48% > TMAR (Proyecto aceptable)

De acuerdo con el resultado el TIR es mayor que la TMAR, lo que sugiere que el proyecto es rentable.

### 10.5.5 Retorno sobre la inversión (ROI):

Es un indicador financiero que mide la rentabilidad de la inversión del proyecto, es decir, la tasa de variación que sufre el monto de una inversión al convertirse en utilidades:

$$ROI = \frac{\text{Utilidad Total} - \text{Inversion}}{\text{Inversion}} * 100$$

Si tenemos:

Utilidades brutas anuales= \$3'766489.13

Tiempo de vida = 15 años

Utilidad Total = \$3'766489.13/año\*15 años= \$ 56'497336.95

Entonces:

$$ROI = \frac{56'497336.95 - 7'812150.78}{7'812150.78} * 100\% = 623.2\%$$

Quiere decir que si se invierte \$ 1.00 en este proyecto, al término de 15 años obtendrá \$623.2 (descontado de la Inversión). En este cálculo no se ha considerado el valor de rescate.

### 10.5.6 Periodo de recuperación de la inversión (PRI):

Este indicador determina en cuanto tiempo se recuperara la inversión realizada. Se puede calcular el PRI de manera gráfica y matemática. La expresión matemática para calcular el PRI, es la siguiente y se muestra en la Tabla 34:

$$PRI = (N - 1) + \frac{\text{Flujo Acumulado}_{n-1}}{\text{Flujo Neto}_n}$$

Donde:

N: es el año en que cambia el flujo acumulado cambia de signo.

Flujo Neto<sub>n</sub>: flujo neto al año N.

Flujo acumuladon.<sub>1</sub>: Flujo acumulado previo al año N.

**Tabla 34. Flujo de caja económico del proyecto para producción del PLA**

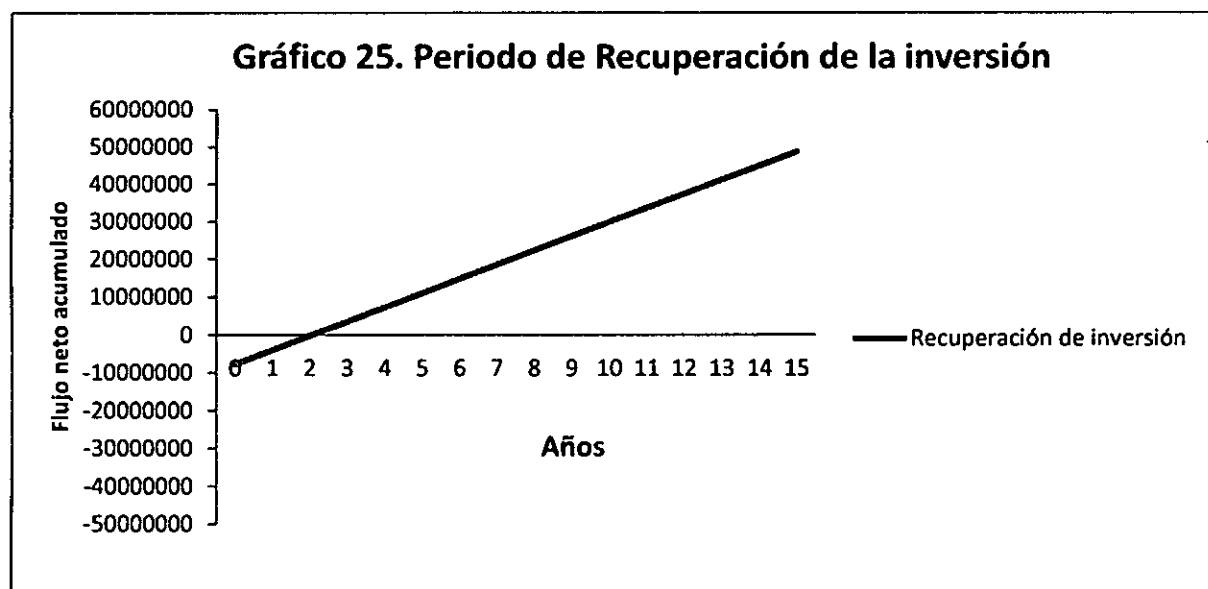
AÑO	FLUJO NETO EFFECTIVO (\$)	FLUJO ACUMULADO (\$)
0	7'812150.78	-7'812150.78
1	3'766489.13	-4'045661.65
2	3'766489.13	-279172.52
3	3'766489.13	3'487316.61
4	3'766489.13	7'253805.74
5	3'766489.13	11'020294.87
6	3'766489.13	14'786784.00
7	3'766489.13	18'553273.13
8	3'766489.13	22'319762.26
9	3'766489.13	26'086251.39
10	3'766489.13	29'852740.52
11	3'766489.13	33'619229.65
12	3'766489.13	37'385718.78
13	3'766489.13	41'152207.91
14	3'766489.13	44'918697.04
15	3'766489.13	48'685186.17

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con esta Tabla se tiene entonces:

$$PRI = (3 - 1) + \frac{554532.61}{3'766489.13} = 2.15 = 2 \text{ años y 2 meses}$$

Según el Gráfico 25 se aprecia el periodo recuperable de la inversión del proyecto en la instalación de una planta química para producción del ácido poliláctico (PLA):



Fuente: Elaboración propia



## 10.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD:

El análisis de sensibilidad del proyecto en la instalación de una planta química se tomará en cuenta tres factores importantes en el desarrollo económico y de producción: costo de la materia prima lactosuero, precio de venta del ácido poliláctico (PLA) y el ritmo de producción. Serán proporcionalmente variados desde -20% hasta 20%, a fin de calcular la variación porcentual en el indicador financiero del valor actual neto (VAN) del proyecto y analizar los resultados en todos los escenarios.

### 10.6.1 Costo de materia prima lactosuero:

El costo del lactosuero interviene directamente con el costo total de producción, el desarrollo de este análisis se detalla en la siguiente Tabla 35:

Tabla 35. Análisis de sensibilidad en el precio de materia prima lactosuero

FACTOR	VARIACIÓN	VAN	%VARIACIÓN VAN
PRECIO MATERIA PRIMA LACTOSUERO	-20%	\$23'879610.82	51.66
	-10%	\$20'845189.89	25.84
	0	\$17'840896.29	0.00
	10%	\$14'776651.34	-25.84
	20%	\$11'741927.15	-51.66

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de la Tabla 35, el VAN incrementa proporcionalmente a medida que el precio de la materia prima lactosuero disminuye.

### 10.6.2 Precio de venta del producto ácido poliláctico (PLA) y subproductos:

El precio de venta del producto PLA no está directamente relacionado con el costo total de producción, pero si en el flujo neto de utilidades. La siguiente Tabla 36 muestra el desarrollo de esta evaluación:

Tabla 36. Análisis de sensibilidad en el precio de venta del producto PLA y subproductos

FACTOR	VARIACIÓN	VAN	%VARIACIÓN VAN
PRECIO DE VENTA DEL PRODUCTO PLA Y SUBPRODUCTOS	-20%	-\$25'028920.93	-364.74
	-10%	-\$3'609075.98	-182.36
	0	\$17'840896.29	0.00
	10%	\$39'230613.94	182.36
	20%	\$60'650458.82	364.74

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestra una gran sensibilidad en la variación del precio de venta del producto PLA y subproductos, el VAN decrece en relación a la disminución del precio de venta.

### 10.6.3 Ritmo de producción:

Los factores más ligados son los costos variables y los ingresos de ventas. El detalle de esta evaluación se muestra en la Tabla 37:

**Tabla 37. Análisis de sensibilidad en el ritmo de producción del PLA**

FACTOR	VARIACIÓN	VAN	%VARIACIÓN VAN
PRODUCCIÓN	-20%	\$-4818868.82	-192.67
	-10%	\$6495950.08	-96.38
	0	\$17840896.29	0.00
	10%	\$29125587.88	96.38
	20%	\$40440406.78	192.67

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Tabla 37, al bajar el ritmo de producción del ácido poliláctico (PLA) disminuye el VAN.

## CAPÍTULO XI

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- 1.- Se determinaron los parámetros fisicoquímicos apropiados del lactosuero requeridas en el proceso químico para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir de dicha materia prima.
- 2.- A partir del estudio de mercado se determinó la capacidad de planta a escala industrial, nuestro proyecto elaborado está enfocado a la demanda futura hasta el año 2022, con una cantidad de 210710.2 TMPA siendo la capacidad de planta proyectada para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA).
- 3.- Según el método de los factores de balanceo el lugar adecuado de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) es en la ciudad de Cajamarca en la zona Norte-Sierra del Perú, el factor determinante es por disponibilidad de la materia prima que es el lactosuero procedente del residuo en la producción de quesos cuyo componente principal es el disacárido lactosa con 4.9 % p/p.
- 4.- La selección del proceso para la conversión del ácido láctico a partir del lactosuero es por fermentación anaeróbica obteniéndose un rendimiento del 90%. Para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) se determinó el método de polimerización por apertura del anillo (ROP), debido a los bajos costos de operación, eficiencia y rendimiento del 80% en el proceso. Siendo en nuestro país dicho proceso químico una alternativa de innovación tecnológica, llegando a obtener un biopolímero de alto peso molecular de 20000 g/mol.
- 5.- En el balance de materia se estableció una base de cálculo a partir de la capacidad de planta proyectada al año 2022 resultando 210710.2 TMPA, determinando así la producción anual del ácido poliláctico (PLA) de 158032.6 TMPA; la cual operará 335 días por año. En el proceso químico se obtiene 19656 kg/h del biopolímero ácido poliláctico (PLA) producido, con una energía 32360 kJ/h necesaria en el reactor de polimerización.
- 6.- Se realizó el diseño de los equipos principales y auxiliares calculadas en base al código ASME en el que se detalla el diseño, construcción y los parámetros requeridos. El proceso cuenta con 16 equipos principales y 16 equipos auxiliares resultando un total de 32 equipos necesarios para la obtención del biopolímero ácido poliláctico (PLA).

7.- Se determinó la naturaleza química del ácido poliláctico (PLA), utilizando el catalizador octoato de estaño y el iniciador alcohol isopropílico en la reacción de polimerización, el mecanismo de la reacción, las condiciones termodinámicas, parámetros y cinética de la reacción en el proceso cuya constante de velocidad a temperatura de reacción 180°C resulta  $k_2=0.1895 \text{ L/mol}\cdot\text{h}$ ; basados en la librería de los simuladores de procesos Chemcad 5.2.0 y Hysys 3.2.0.

8.- A partir del diagrama de Layout se determinó el diseño de la planta química del ácido poliláctico (PLA) con un área de 5630 m<sup>2</sup>; que nos permitirá conocer la distribución y ubicación de los equipos considerados en el proceso; cuya dimensiones del terreno son de ancho 105.10 m y largo 53.57 m.

9.- Se evaluaron los impactos ambientales en la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir de la matriz de Leopold; considerando los siguientes factores: el medio atmosférico, medio terrestre, consumo de recursos, el paisaje y el medio socioeconómico. Se analizó que los puntos más críticos se concentran en el consumo de recursos, en la calidad del medio atmosférico y la composición del medio terrestre; pero se realizarán las medidas correctivas basadas en los sistemas de gestión del medio ambiente.

10.- En la evaluación económica se obtuvieron resultados favorables como un VAN de \$17'840896.29 y un TIR del 48%, cuya rentabilidad del proyecto es 623.2%. Resultando así la factibilidad técnico y económica del proyecto para instalación de una planta química en el Perú para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.

## CONCLUSIONES

- 1.- Se pudo evaluar los distintos métodos de síntesis para la obtención del ácido láctico y el ácido poliláctico (PLA), llegando a concluir de que la fermentación anaeróbica logra buen rendimiento al utilizar el microorganismo *Lactobacillus Bulgaricus* y el método de polimerización por rompimiento del anillo (ROP) son las más viables, siendo éstas seleccionadas para el proceso químico por sus bajos costos de operación, mejor eficiencia y rendimiento.
- 2.- Se concluye que la capacidad de planta proyectada al año 2022 para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) corresponde a una cantidad de 210710.2 TMPA.
- 3.- Se determina que en el Perú, exactamente en la ciudad de Cajamarca es factible la instalación de una planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir de los factores de balanceo.
- 4.- Realizada la evaluación y la factibilidad técnico-económico, se llegó a la conclusión de que es rentable invertir en el proyecto de instalar una planta química para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero en nuestro país, obteniendo resultados favorables en el VAN, TIR y rentabilidad de la inversión. Así como también ingresos por la venta de subproductos como son el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y lactato de calcio  $(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}$ .
- 4.- Se determinó que los resultados obtenidos en el proyecto muestra sensibilidad en la variación del precio de venta del producto PLA y subproductos, el VAN decrece en relación a la disminución del precio de venta a un 10% a 20%.
- 5.- Se concluye que se determinaron el objetivo general y objetivos específicos de la Tesis planteado, con la finalidad de que resulta factible la instalación de una planta química para producción biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero.

## RECOMENDACIONES

- 1.- La preocupación por el impacto ambiental es cada vez mayor y los métodos de disposición son limitados, así como los recursos petroleros; por lo que es imprescindible encontrar sustitutos duraderos. Por lo que se recomienda seguir investigando para obtener polímeros biodegradables como alternativa, sin embargo aún hay mucho por hacer en cuanto a su tecnología de producción, debido a que es necesario el desarrollo de procesos menos costosos y más ecológicos para nuestro ambiente.
- 2.- A partir del estudio de mercado por la carestía de polímeros a partir del petróleo, su carácter contaminante y el hecho de que es una fuente que acabará por agotarse, ha llevado a algunas partes de la industria a buscar alternativas. Se recomienda el uso del biopolímero ácido poliláctico (PLA) por ser una sustancia química que tiene la cualidad de ser biocompatible, biodegradable, antialérgico, atóxico y reabsorbible por lo que no puede producir rechazo, no alerta al sistema inmunológico y se reabsorbe completamente.
- 3.- El ácido poliláctico (PLA) es uno de los más utilizados a nivel mundial, sin embargo aún hay mucho por hacer en cuanto a su tecnología de producción, debido a que es necesario el desarrollo de procesos más económicos y más ecológicos para nuestro ambiente, usando materias primas renovables.

## BILBIOGRAFÍA

- [1] <http://www.textoscientificos.com/polimeros/acido-polilactico>.
- [2] HARPER, C. A. *Modern Plastics Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [3] LUNT, J. and Shafer, A. "Polylactic Acid Polymers from Corn: Potential Applications in the Textiles Industry".
- [4] O'BRIEN, M. and Gray, J. "Federal Trade Commission Announces New Fiber Generic: Cargill m Dow's Natureworks<sup>TM</sup> fibers Receive First Designation of the Century." Available (March 2002).
- [5] "Degradación de los Materiales Plásticos", Boletín Tec. Inf. N°21, Gerencia Técnica, Centro de Inf. Técnica, Plastivida Argentina, 2008.
- [6] PURAC. "Medical and pharmaceutical implants". Documentación Purac. <http://www.purac.com>. Hollande 2006.
- [7] Polylactic acid (PLA): properties, market and perspectives. <http://biopol.free.fr/Pág 282>.
- [8] PRODUCCIÓN PECUARIA. INFORME ANUAL 2006-2011.
- [9] FEDIT. Observatorio Industrial del Sector Químico. Bioplásticos. LEIA 2007.
- [10] Fuente Aranceles Producción Mundial de PLA 2012.
- [11] SCOTT, G. Green polymers. POLYM Degrad Stab, Pág 68:1-7.
- [11] <http://www.perulactea.com/2012>.
- [12] Datos obtenidos de la Encuesta Anual Manufacturera DANE, 2000. Datos registrados para la agrupación CIU 356, Sector Productos de Plástico.
- [13] Alais, C. 2003. Ciencia de la leche. 2da Ed. España: Editorial Reverte S.A. Pág 843.
- [14] Angulo Sánchez, "Caracterización Fisicoquímica de Polímeros", Ed. Limusa (Noriega Editores) CIQA. Págs 15-19.
- [15] CHEM SYSTEMS. Biotech Routes to Lactic Acid/Polylactic acid. Report Alert Chem system, Jun 2010.
- [17] Smith J.M., Introducción a la termodinámica en la ingeniería química, McGraw-Hill, 1997
- [18] Eliminación de grasas del lactosuero, obtener proteínas y lactosa. Rosane Souza y Carmen Muller. Pág. 13, 2009.
- [19] El uso de membranas en la industria láctea. Grupo de Asistencia Técnica S.R.L. Septiembre 2010
- [20] Tecnología de membranas en la agroindustria láctea. Alejandro Chacón-Villalobos.
- [21] Química Orgánica T.W.G. Solomons. Págs. 966-973.
- [22] [http://www.ecured.cu/index.php/Sulfato\\_de\\_calcio](http://www.ecured.cu/index.php/Sulfato_de_calcio).

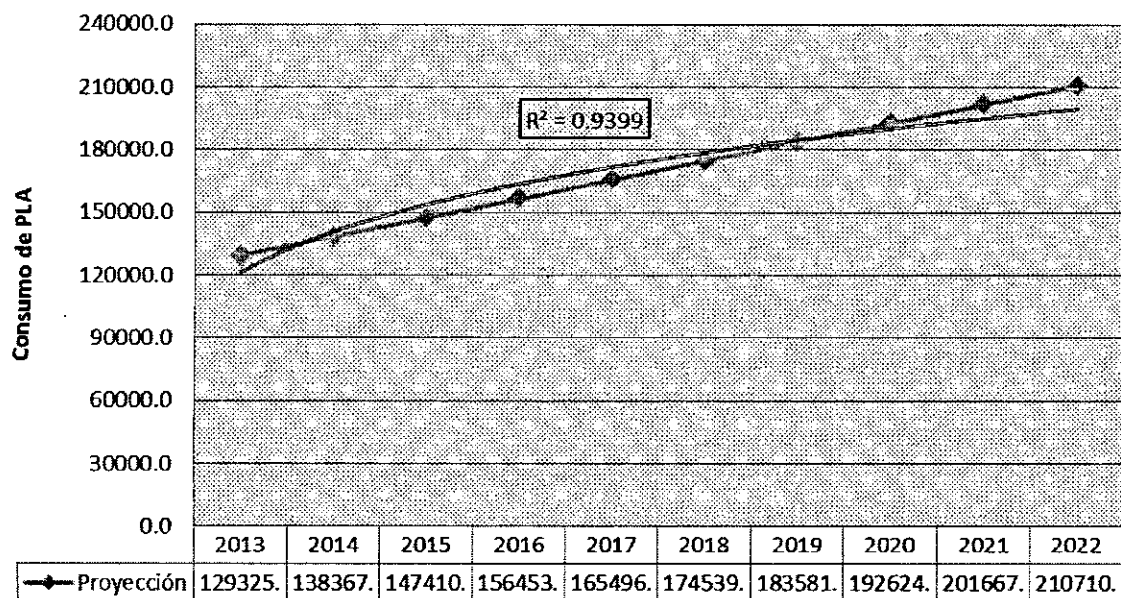
- [23] Achmad F., Yamane K., Quan S., Kokugan T. Synthesis of polylactic acid by direct polycondensation N° 151, Págs 342–350.
- [24] Ramírez A., Katime I. Diseño de reactores de polimerización. Revista de Polímeros 2009, vol. 6 Págs 299-320.
- [25] [http://www.google.com.pe/simulation.netweb\\_documentscapacidad\\_de\\_la\\_plantarev.01.doc](http://www.google.com.pe/simulation.netweb_documentscapacidad_de_la_plantarev.01.doc).
- [25] McCrum, N.G. and Bucknall C.B. "Principle of Polymer Engineering" Oxford Science Publications.
- [26] Estudio y síntesis en la producción de Ácido Poliláctico (PLA). Tesis de Maestría en tecnología avanzada. 2007. México D.F.
- [27] DUARTE T., Alberto. Introducción a la Ingeniería Bioquímica. Publicación Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1995.
- [28] Distribución de planta, cálculo y ubicación de máquinas Pág 14.
- [29] Código Peruano de la Construcción. Ordenanza municipal básica de construcciones.
- [30] Ingeniería Química Diseño de Planta y Distribución Ing. Jairo Maldonado, Mayo 2008. Págs 115-118.
- [31] DECRETO SUPREMO N° 014-2010-MINAM-014 LMP Para emisiones Gaseosas.
- [32] Tesis de Ácido Láctico, Publicación 2 de febrero 2010, Págs 248-274.
- [33] Libro Chemical Properties, HandBook. Editorial: McGraw-Hill Professional 1998-10-01.
- [34] Geankoplis, Christie J. Procesos de transporte y operaciones unitarias Págs 337-357.
- [35] Ingeniería de Proyectos para Plantas de Procesos, Rase Barrow. Compañía Editorial Continental Séptima Edición Págs 239-250.
- [36] Diseño de Plantas y su Evaluación Económica para Ingenieros Químicos, Peter & Timmerhaus. Editorial Géminis S.R.L. Edición 1978.
- [37] Suriderp, C. Ullman's Encyclopedia of industrial chemistry: ácido láctico. 5 Edition de Barbara Elvers, 1995. Págs 97-104.
- [38] Anderson JM, Shive MS. Biodegradation and Biocompatibility of PLA and PLGA microspheres. Adv Drug Del Rev 1997; Págs 5-24.
- [39] VICK ROY, T. "Lactic acid". En Comprehensive Biotechnology. 3 Edition, 1985; Págs 761-789.
- [40] Simulador de Procesos Químicos Chemcad 5.2 y Hysys 3.2.0
- [41] Apéndice del Libro Procesos de Transferencia de Calor, Donald Kern. Editorial CECSA. Edition 2006.
- [42] Principios de Operaciones Unitarias, Segunda Edición Editorial Continental, 2006. Apéndice C.



# ANEXOS

## ESTUDIO DE MERCADO

**GRÁFICO 1. PROYECCION DEMANDA FUTURA DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) HASTA EL AÑO 2022**



Elaboración propia Fuente: Arancelaria de Producción Mundial 2012

Se utilizará para su estimación de la demanda futura, el método de mínimos cuadrados mediante las siguientes fórmulas:

$$\Sigma y = na + b \Sigma x$$

$$825752 = 11a + 55b \dots (1)$$

$$\Sigma xy = a \Sigma x + b \Sigma x^2$$

$$5123471 = 55a + 385b \dots (2)$$

Resolviendo la ecuación 1 y 2 se obtiene:

Por lo tanto el consumo del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero se ajustó a la ecuación del modelo de regresión:

$$y = 29854.2 + 9042.8x$$

La estimación de demanda futura del ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero es:

$$Y_{2022} = 29854.2 + 9042.8(20)$$

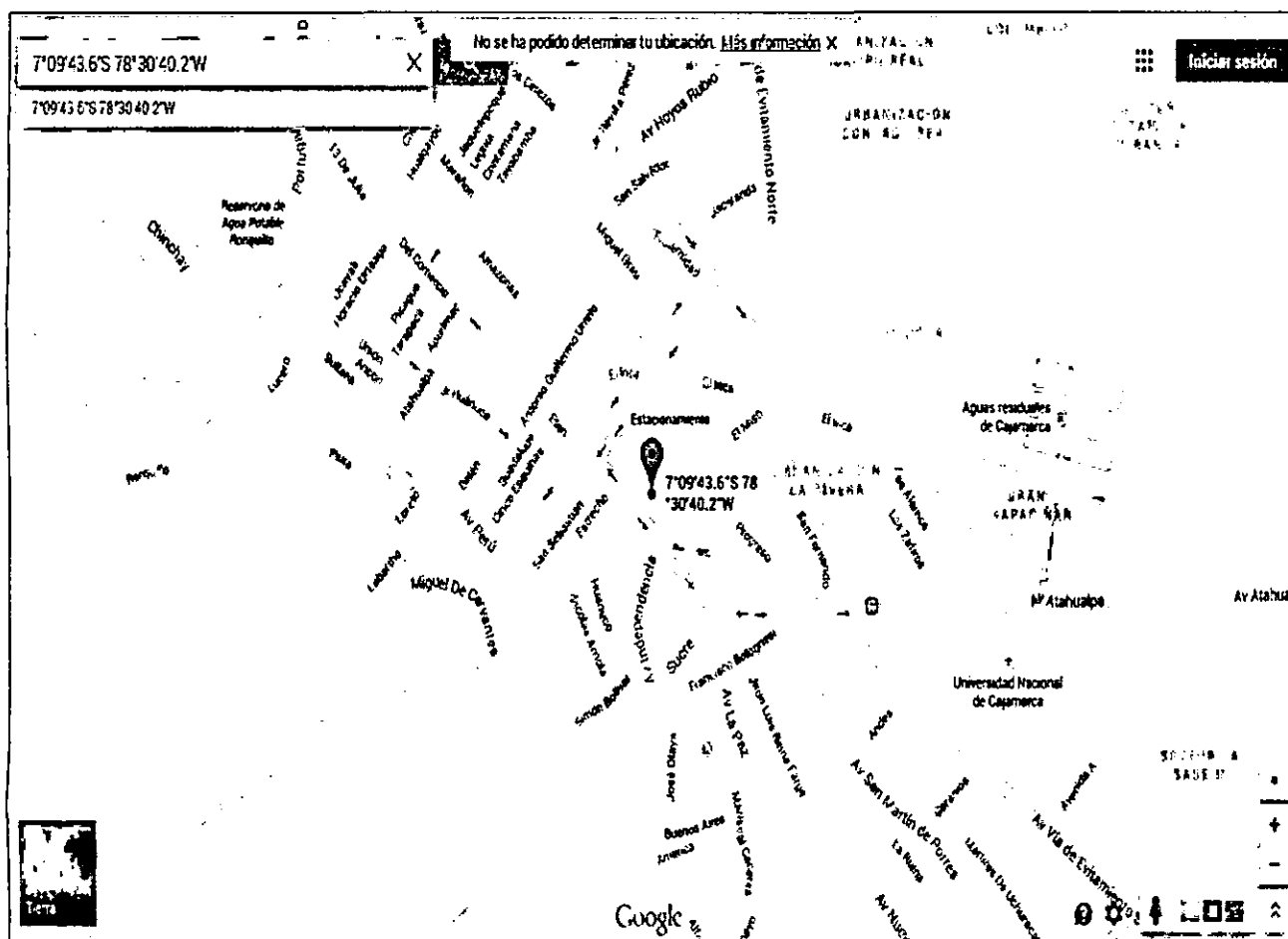
$$Y_{2022} = 210710.2 \text{ TMPA}$$

La solución del modelo se representa en Gráfico 1 con demanda futura hasta el año 2022.

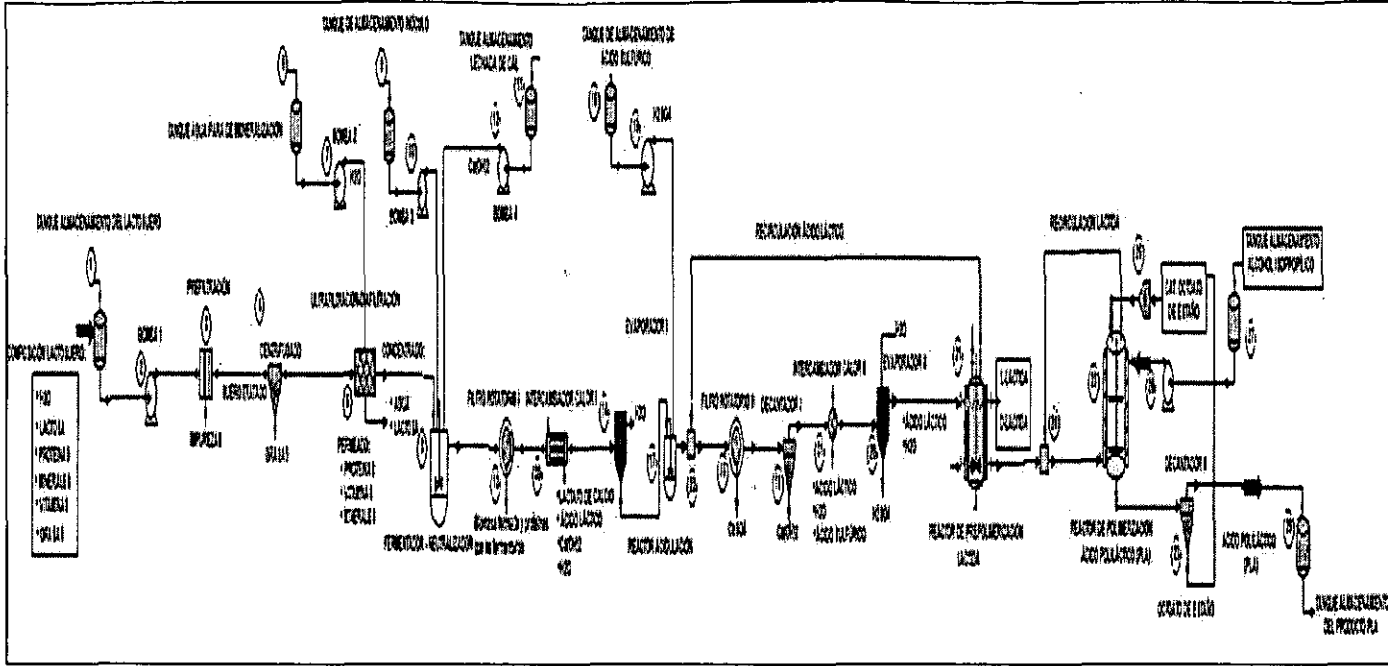
## UBICACIÓN DE LA PLANTA

La ubicación de la planta química para la producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero es en la ciudad de **Cajamarca** la zona Norte- Sierra del Perú. Se determinó la ubicación con en el navegador Google Earth cuyas coordenadas geográficas son las siguientes: **7°09'43.6''S y 78°30'40.2''W**.

**Figura 1. Ubicación de Planta Química de Ácido Poliláctico (PLA) en Cajamarca**



SELECCIÓN Y DISEÑO DEL PROCESO



TESIS: "ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO - ECONÓMICO PARA LA PRODUCCIÓN DEL BIOPOLÍMERO ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) A PARTIR DEL LACTOSUERO"	
Date:	BT. KARINA MERCEDES YAMUNAGUE CHERO
Checked:	TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO
Approved:	Ing. Msc. GUIDO TICONA OLARTE Ing. CLAUDIO RODRÍGUEZ GÓMEZ

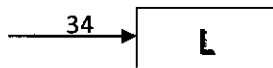
Gráfico 2. Diagrama de flujo del proceso ácido poliláctico (PLA) a partir del lactosuero

### BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO:

La capacidad de planta proyectada al año 2022 es de 210710.2 TPA, para determinar la cantidad de producción anual del biopolímero es del 75% respecto a la capacidad de planta resultando 158032.6 TPA; puesto que ningún equipo o persona puede trabajar continuamente sin presentar errores, además los productos suelen presentar una inferencia entre sí, tener en cuenta que se considerará que un año tendrá 335 días por ser más exacto la cantidad de operación de la planta. Los balances de materia son los siguientes:

$$158032.6 \frac{\text{TM}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{335 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ TM}} = 19656 \text{ kg PLA/h} = m_{34} \text{ PLA}$$

#### ✓ TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE PLA:



$$19656 \text{ kg PLA/h} = m_{34} \text{ PLA}$$

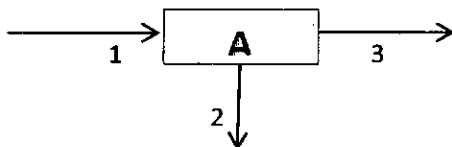
Para hallar la cantidad de materia prima en base a 1 hora, se determina respecto a la relación que 19656 kg PLA producido se necesitan 24570 kg de lactosuero alimentado. A continuación se determinará el rendimiento del proceso químico:

$$\text{Rendimiento} = \frac{m_{34} \text{ PLA producido}}{m_1 \text{ LACTOSUERO alimentado}}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{19656 \text{ kg PLA}}{24570 \text{ kg Lactosuero alimentado}}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{0.80 \text{ kg PLA producido}}{\text{kg Lactosuero alimentado}} = 80\% \text{ Rend. proceso}$$

#### ✓ PREFILTRACIÓN:



➤ **BALANCE DE LACTOSA:** Con composición 4.9% (P/P)

$$m_{1 \text{ LACTOSA}} = 0.049 \text{ kg LACTOSA/kg} * 24570 \text{ kg/h}$$

$$m_{1 \text{ LACTOSA}} = 1203.9 \text{ kg LACTOSA/h}$$

➤ **BALANCE DE MINERALES :** Con composición de 0.6%(P/P)

$$m_{1 \text{ MINERALES}} = 0.006 \text{ kg MINERALES/kg} * 24570 \text{ kg/h}$$

$$m_{1 \text{ MINERALES}} = 147.4 \text{ kg MINERALES/h}$$

➤ **BALANCE DE H<sub>2</sub>O:** Con composición de 93.1 % (P/P)  
 $m_{1 \text{ H}_2\text{O}} = 0.931 \text{ kg H}_2\text{O/kg} * 24570 \text{ kg/h} = 22874.7 \text{ kg H}_2\text{O/h}$

➤ **BALANCE DE GRASAS:** Con composición de 0.3 % (P/P)  
 $m_{1 \text{ GRASA}} = 0.003 \text{ kg GRASA/kg} * 24570 \text{ kg/h} = 73.7 \text{ kg GRASA /h}$

➤ **BALANCE DE PROTEINAS :** Con composición de 0.9 % (P/P)  
 $m_{1 \text{ PROTEINAS}} = 0.009 * 24570 \text{ kg/h} = 221.1 \text{ kg PROTEINAS / h}$

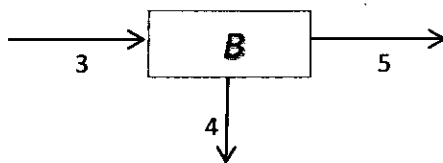
➤ **BALANCE DE VITAMINAS :** Con composición de 0.2 % (P/P)  
 $m_{1 \text{ VITAMINAS}} = 0.002 * 24570 \text{ kg/h} = 49.1 \text{ kg VITAMINAS/h}$

➤ **BALANCE LACTOSUERO FRESCO:**  
 $m_{1 \text{ LACTOSUERO FRESCO}} = 1204 + 147.4 + 22874.7 + 73.7 + 221.1 + 49.1$   
 $m_1 = 24570 \text{ kg LACTOSUERO FRECO /h}$

➤ **BALANCE DE IMPUREZAS :** Las impurezas que se eliminan en la etapa de prefiltración es de 0.244 % respecto al suero alimentado:  
 $m_2 = 24570 * 0.00244 = 60 \text{ kg impurezas /h}$

➤ **BALANCE DE SUERO TRATADO :**  
 $m_3 = 24570 - 60 = 24510 \text{ kg SUERO TRATADO /h}$

✓ **BALANCE EN LA CENTRÍFUGA:**



➤ **BALANCE DE GRASAS:**  
 $m_3 \text{ GRASA} = m_4 \text{ GRASA} = 24510 * 0.003 = 73.5 \text{ kg GRASA/h}$

➤ **BALANCE DE H<sub>2</sub>O:**  
 $m_3 \text{ H}_2\text{O} = m_5 \text{ H}_2\text{O} = 24510 * 0.931 = 22818.8 \text{ kg H}_2\text{O/h}$

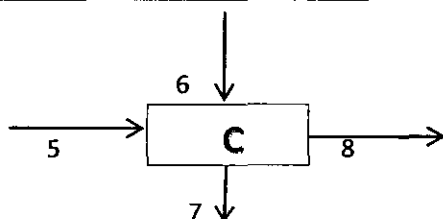
➤ **BALANCE DE MINERALES:**  
 $m_3 \text{ MINERALES} = m_5 \text{ MINERALES} = 24510 * 0.006 = 147.1 \text{ kg MINERALES /h}$

➤ **BALANCE DE LACTOSA :**  
 $m_3 \text{ C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} = m_5 \text{ C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} = 24570 * 0.049 = 1201 \text{ kg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}/\text{h}$

➤ **BALANCE DE PROTEINAS :**  
 $m_3 \text{ PROTEINAS} = m_5 \text{ PROTEINAS} = 24510 * 0.009 = 220.6 \text{ Kg PROTEINAS/h}$

➤ **BALANCE DE VITAMINAS :**  
 $m_3 \text{ VITAMINAS} = m_5 \text{ VITAMINAS} = 24510 * 0.002 = 49 \text{ Kg VITAMINAS/h}$

✓ ULTRAFILTRACIÓN-DIAFILTRACIÓN :



➤ BALANCE DE MINERALES:

$$m_5 \text{ MINERALES} = m_7 \text{ MINERALES} = 147.1 \text{ kg MINERALES/h}$$

➤ BALANCE DE PROTEINAS :

$$m_5 \text{ PROTEÍNAS} = m_7 \text{ MINERALES} = 220.6 \text{ kg PROTEINAS/h}$$

➤ BALANCE DE H<sub>2</sub>O: El agua requerida es 100% en exceso de los componentes de la corriente 7 para la separación respectiva en la operación.

$$m_6 \text{ H}_2\text{O} = 2 * m_7$$

$$m_6 \text{ H}_2\text{O} = 2 * 416.7 = 833.4 \text{ kg H}_2\text{O/h}$$

$$m_6 = 833.4 \text{ kg H}_2\text{O/h}$$

$$m_7 = 416.7 \text{ kg H}_2\text{O/h}$$

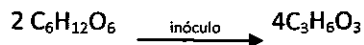
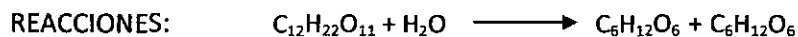
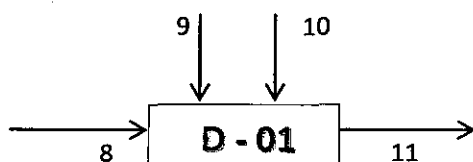
$$m_8 \text{ H}_2\text{O} = 22818.8 + 833.4 = 23652.2 \text{ kg H}_2\text{O/h}$$

➤ BALANCE DE VITAMINAS :

$$m_5 \text{ VITAMINAS} = m_7 \text{ VITAMINAS} = 49 \text{ Kg VITAMINAS/h}$$

➤ BALANCE DE LACTOSA :  $m_5 \text{ LACTOSA} = m_8 \text{ LACTOSA} = 1201 \text{ kg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}/\text{h}$

✓ BALANCE EN EL FERMENTADOR:



Cada 6 horas agregamos lechada de cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para regular el pH de 5 hasta 7:

➤ BALANCE DE C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub> :  $E = S + C$

$$n_{\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} = \frac{1 \text{ kmol C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}{342 \text{ kg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} * 1201 \text{ kg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$$

$$n_{\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} = 3.51 \text{ kmol C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \text{ ALIMENTADO/h}$$

El 98% de  $C_{12}H_{22}O_{11}$  (lactosa) se convierte a  $C_3H_6O_3$

$$n_{C_{12}H_{22}O_{11} \text{ CONS}} = 0.98 * 3.51 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11} / h = 3.44 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11} / h$$

➤ BALANCE DE BIOMASA NO FERMENTADA:  $E = S + C$

$$n_{\text{BIOMASA NO FERMENTADA SALE}} = 3.51 - 3.44 = 0.77 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11} / h$$

$$m_{11 \text{ BIOMASA NO FERMENTADA}} = 0.77 \text{ kmol} * \frac{342 \text{ kg } C_{12}H_{22}O_{11}}{1 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11}} = 23.9 \text{ kg } C_{12}H_{22}O_{11} / h$$

$$m_{11 \text{ BIOMASA NO FERMENTADA}} = 23.9 \text{ kg BIOMASA NO FERMENTADA (BIOMASA)} / h$$

➤ BALANCE DE ACIDO LÁCTICO :  $G = S$  ( EN LA 1° REACCIÓN)

$$n_{\text{ACIDO LACTICO gener}} = 3.44 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11} / h * \frac{4 \text{ kmol } C_3H_6O_3}{1 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11}}$$

$$n_{\text{ACIDO LACTICO gener}} = 13.76 \text{ kmol } C_3H_6O_3 / h$$

➤ BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO :  $E = S + C$  ( EN LA 2° REACCIÓN)

Con una conversión del 75% de  $C_3H_6O_3$  a  $(C_3H_5O_3)_2Ca$

$$n_{\text{ACIDO LACTICO CONS}} = 13.76 \text{ kmol } C_3H_6O_3 / h * 0.75$$

$$n_{\text{ACIDO LACTICO CONS}} = 10.32 \text{ kmol } C_3H_6O_3 \text{ cons.} / h$$

$$n_{\text{ACIDO LACTICO ALIM}} = 3.51 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11} * \frac{2 \text{ kmol } C_6H_{12}O_6}{1 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11}} * \frac{4 \text{ kmol } C_3H_6O_3}{2 \text{ kmol } C_6H_{12}O_6}$$

$$n_{\text{ACIDO LACTICO ALIM}} = 14.04 \text{ kmol } C_3H_6O_3 / h$$

$$n_{\text{ACIDO LACTICO SALE}} = 14.04 - 10.32 = 3.72 \text{ kmol } C_3H_6O_3 / h$$

$$n_{13 \text{ ACIDO LACTICO}} = 13.76 + 3.72 = 17.48 \text{ kmol } C_3H_6O_3 / h$$

$$m_{13 \text{ ACIDO LACTICO}} = 17.48 \text{ kmol } C_3H_6O_3 / h * \frac{90 \text{ kg } C_3H_6O_3}{1 \text{ kmol } C_3H_6O_3} = 1573.2 \text{ kg } C_3H_6O_3 / h$$

➤ BALANCE DE  $H_2O$ :  $E = S + C$  ( EN LA 1° REACCIÓN)

$$n_{H_2O \text{ ALIM}} = 23652.2 \text{ kg } H_2O * \frac{1 \text{ kmol } H_2O}{18 \text{ kg } H_2O} = 1314 \text{ kmol } H_2O \text{ ALIM.} / h$$

$$n_{H_2O \text{ CONS}} = 3.44 \text{ kmol } C_3H_6O_3 \text{ CONS.} / h * \frac{1 \text{ kmol } H_2O (c)}{1 \text{ kmol } C_3H_6O_3 (c)} = 3.44 \text{ kmol } H_2O \text{ cons.} / h$$

$$n_{H_2O \text{ SALE}} = 1314 - 3.44 = 1310.56 \text{ kmol } H_2O$$

➤ BALANCE DE  $H_2O$ :  $E + G = S$  ( EN LA 2° REACCIÓN)

$$n_{H_2O \text{ ALIM}} = 3.51 \text{ kmol } H_2O \text{ ALIM.} / h * \frac{1 \text{ kmol } C_{12}H_{22}O_{11}}{1 \text{ kmol } C_3H_6O_3} = 3.51 \text{ kmol } H_2O \text{ alim.} / h$$

$$n_{H_2O \text{ CONS}} = 10.32 \text{ kmol } C_3H_6O_3 \text{ cons.} * \frac{2 \text{ kmol } H_2O (g)}{2 \text{ kmol } C_3H_6O_3 (c)} = 10.32 \text{ kmol } H_2O \text{ gener.} / h$$

$$n_{H_2O \text{ SALE}} = 3.51 + 10.32 = 13.83 \text{ kmol } H_2O$$

$$n_{13 H_2O \text{ SALE}} = 1310.56 - 13.83 = 1296.73 \text{ kmol } H_2O * \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O} = 23341.1 \text{ kg } H_2O / h$$

➤ BALANCE DE LACTATO DE CALCIO:  $G = S$

$$n_{(C_3H_5O_3)_2Ca} = 10.32 \text{ kmol } C_3H_6O_3 (c) * \frac{1 \text{ kmol } (C_3H_5O_3)_2Ca (g)}{2 \text{ kmol } C_3H_6O_3 (c)}$$

$$n_{(C_3H_5O_3)_2Ca \text{ SALE}} = 5.16 \text{ kmol } (C_3H_5O_3)_2Ca \text{ cons.} / h$$

$$n_{11 (C_3H_5O_3)_2Ca \text{ SALE}} = 5.16 \text{ kmol } (C_3H_5O_3)_2Ca * \frac{218 \text{ kg } (C_3H_5O_3)_2Ca}{1 \text{ kmol } (C_3H_5O_3)_2Ca}$$

$$m_{11 (C_3H_5O_3)_2Ca \text{ SALE}} = 1124.9 \text{ kg } (C_3H_5O_3)_2Ca / h$$



➤ **BALANCE DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :  $E = S + C$**

Con un 30% en exceso de hidróxido de calcio

$$n \text{ Ca}(\text{OH})_2 = \frac{1 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2 (\text{C})}{2 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3 (\text{C})} * 10.32 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3 (\text{C})$$

$$n \text{ Ca}(\text{OH})_2 \text{ CONS} = 5.16 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2 (\text{C})/\text{h}$$

$$n_{10} \text{ Ca}(\text{OH})_2 \text{ ALIM} = 1.30 * 5.16 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2 = 6.71 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$$

$$m_{10} \text{ Ca}(\text{OH})_2 \text{ ALIM} = 6.71 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2/\text{h} * \frac{74 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2}{1 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2}$$

$$m_{10} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = 496.5 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2 \text{ aliment.}/\text{h}$$

$$m_{11} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = 6.71 - 5.16 = 0.5 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2$$

$$m_{11} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = 1.55 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2 * \frac{74 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2}{1 \text{ kmol Ca}(\text{OH})_2}$$

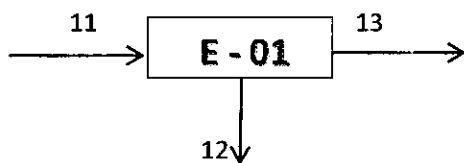
$$m_{11} \text{ Ca}(\text{OH})_2 \text{ SALE} = 114.7 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE INÓCULO  $E = S + C$**

La concentración de inoculo con respecto a la alimentación en el fermentador es del 5%V/V, lo cual se determina la cantidad necesaria del inoculo. La densidad de la mezcla en lactosa es de  $1520 \text{ kg/m}^3$  y la densidad del inoculo es de  $1013 \text{ kg/m}^3$

$$m_9 \text{ INOCULO} = 24853.2 \text{ kg} * \frac{1 \text{ m}^3}{1520 \text{ kg}} * 0.05 * \frac{1013 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 828.1 \text{ kg INOCULO} / \text{h}$$

✓ **FILTRO ROTATORIO:**



El filtro rotatorio retiene la biomasa no fermentada, con un porcentaje de humedad del 99% respecto a la alimentación.

➤ **BALANCE DE AGUA :**

$$m_{12} \text{ H}_2\text{O} = 0.99 * 23341.1 = 23.3 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

$$m_{13} \text{ H}_2\text{O} = 23341.1 - 23.3 = 23317.8 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

➤ **BALANCE DE BIOMASA Y PROTEINAS NO FERMENTADAS :**

$$m_{11} \text{ BIOMASA} = m_{12} \text{ BIOMASA} = 23.9 \text{ kg BIOMASA NO FERMENTADA}/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :**

$$m_{11} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = m_{13} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = 114.7 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$$

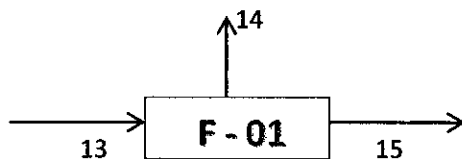
➤ **BALANCE DE LACTATO DE CALCIO :**

$$m_{11} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = m_{13} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = 1124.9 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE ACIDO LÁCTICO:**

$$m_{11} (\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = m_{13} (\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 1573.2 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) / \text{h}$$

✓ EVAPORADOR DE LACTATO DE CALCIO:



➤ BALANCE DE LACTATO DE CALCIO:

$$m_{13} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = m_{15} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = 1124.9 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca/h}$$

➤ BALANCE DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :

$$m_{13} \text{Ca}(\text{OH})_2 = m_{15} \text{Ca}(\text{OH})_2 = 114.7 \text{ kg } \text{Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$$

➤ BALANCE DE AGUA :

Se evapora aproximadamente 30% de concentración requerida:

$$m_{14} \text{H}_2\text{O} = 0.30 * m_{13} \text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots (1)$$

$$m_{15} \text{H}_2\text{O} = 0.70 * m_{13} \text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots (2)$$

$$m_{14} \text{H}_2\text{O} = 0.30 * 23317.8 = 6995.4 \text{ kg } \text{H}_2\text{O}/\text{h}$$

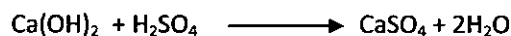
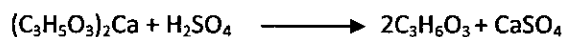
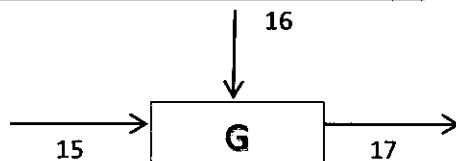
$$m_{15} \text{H}_2\text{O} = 0.70 * 23317.8 = 16322.4 \text{ kg } \text{H}_2\text{O}/\text{h}$$

➤ BALANCE DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :  $m_{13} \text{Ca}(\text{OH})_2 = m_{15} \text{Ca}(\text{OH})_2 = 114.7 \text{ kg } \text{Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$

➤ BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO:

$$m_{13} (\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = m_{15} (\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) = 1573.2 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3) / \text{h}$$

✓ BALANCE EN EL REACTOR DE ACIDULACIÓN:



➤ BALANCE DE LACTATO DE CALCIO : E = S + C

Con una conversión del 85% de lactato de calcio a ácido láctico.

$$n_{(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}} = 0.85 * 5.16 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}$$

$$n_{(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}} = 4.39 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca consumidos/h}$$

$$n_{17} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca sale} = 5.16 - 4.39 = 0.77 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca/h}$$

$$m_{17} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca sale} = 0.77 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} * \frac{218 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}}{1 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}}$$

$$m_{17} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca sale} = 167.9 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca sale/h}$$

➤ BALANCE DE ACÍDO LÁCTICO :  $E + G = S$

$$n(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{gener.}} = 4.39 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}(c) * \frac{2 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 (g)}{1 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}(c)}$$

$$n(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{gener.}} = 8.78 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 (g) / h$$

$$n_{15}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{ALIMENT.}} = 1573.2 \text{ kg } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 (g) / h * \frac{1 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3}{90.08 \text{ kg } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3}$$

$$n_{15}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{ALIMENT.}} = 17.5 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 / h$$

$$n_{17}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{SALE}} = 8.78 + 17.5 = 26.28 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 / h$$

$$m_{17}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{SALE}} = 26.28 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 * \frac{90.08 \text{ kg } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3}{1 \text{ kmol } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3}$$

$$m_{17}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_{\text{SALE.}} = 2367.3 \text{ kg } \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 / h$$

➤ BALANCE DE  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :  $E = S + C$

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{cons Rx}_1} = \frac{1 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ cons}}{1 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca cons}} * 4.39 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}(c)$$

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{cons}} = 4.39 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ cons} / h$$

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{cons Rx}_2} = \frac{1 \text{ kmol } \text{CaSO}_4 (g)}{1 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}(c)} * \frac{1 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 (c)}{1 \text{ kmol } \text{CaSO}_4 (g)} * 4.39 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}(c)$$

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{cons}} = 4.39 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ cons} / h$$

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{cons TOTAL}} = 8.78 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ cons} / h$$

Con un exceso del 34 % de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :

$$n_{16}(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{aliment}} = 1.34 * 8.78 = 11.77 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 / h$$

$$m_{16} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aliment} = 11.77 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 * \frac{98 \text{ kg } \text{H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4}$$

$$m_{16} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ aliment} = 1553.2 \text{ kg } \text{H}_2\text{SO}_4 / h$$

$$n(\text{H}_2\text{SO}_4)_{\text{sale}} = 11.77 - 8.78 = 2.99 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 / h$$

$$m_{17} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ sale} = 2.99 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 * \frac{98 \text{ kg } \text{H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4} = 293.0 \text{ kg } \text{H}_2\text{SO}_4 / h$$

$$m_{17} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ sale} = 293.0 \text{ kg } \text{H}_2\text{SO}_4 / h$$

➤ BALANCE DE  $\text{CaSO}_4$  :  $G = S$

$$n(\text{CaSO}_4)_{\text{gener. Rx}_1} = \frac{1 \text{ kmol } \text{CaSO}_4 \text{ gener.}}{1 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca cons}} * 4.39 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca cons.}$$

$$n(\text{CaSO}_4)_{\text{gener. Rx}_2} = \frac{1 \text{ kmol } \text{CaSO}_4 \text{ gener.}}{1 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca cons}} * 4.39 \text{ kmol } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca cons.}$$

$$n(\text{CaSO}_4)_{\text{sale}} = 8.78 \text{ kmol } \text{CaSO}_4 \text{ gener.} / h * \frac{136 \text{ kg } \text{CaSO}_4 \text{ gener.}}{1 \text{ kmol } \text{CaSO}_4 \text{ gener.}}$$

$$m_{17} \text{CaSO}_4 = 1194.1 \text{ kg } \text{CaSO}_4 / h$$

➤ BALANCE DE  $\text{H}_2\text{O}$  :  $E + G = S$

$$(n_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{gener}} = \frac{2 \text{ kmol } \text{H}_2\text{O gener.}}{1 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ cons}} * 8.78 \text{ kmol } \text{H}_2\text{SO}_4 (c)$$

$$(n_{\text{H}_2\text{O}})_{\text{gener}} = 17.56 \text{ kmol } \text{H}_2\text{O gener.} / h$$

$$m_{15} \text{H}_2\text{O} = 16322.4 \text{ kg } \text{H}_2\text{O} / h$$

$$(n_{15} \text{H}_2\text{O}) = 906.8 \text{ kmol } \text{H}_2\text{O} / h$$

$$n_{17} \text{H}_2\text{O sale} = 906.8 + 17.56 = 924.36 \text{ kmol } \text{H}_2\text{O} / h$$

$$n_{17} \text{H}_2\text{O sale} = 924.36 \text{ kmol } \text{H}_2\text{O} / h * \frac{18 \text{ kg } \text{H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol } \text{H}_2\text{O}}$$

$$m_{17} \text{H}_2\text{O sale} = 16638.5 \text{ Kg } \text{H}_2\text{O} / h$$

➤ BALANCE DE  $\text{Ca(OH)}_2$ :  $E = S + C$

Con 30 % de conversión de la lechada de cal, por lo que reacciona con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

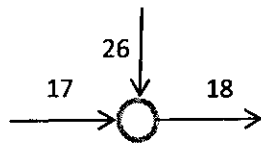
$$n_{\text{Ca(OH)}_2 \text{ CONS}} = 2 \text{ kmol H}_2\text{SO}_4 (c) * \frac{1.55 \text{ kmol Ca(OH)}_2 \text{ gener}}{4.39 \text{ kmol H}_2\text{SO}_4 \text{ cons}} = 0.70 \text{ kmol Ca(OH)}_2 \text{ cons/h}$$

$$n_{15 \text{ Ca(OH)}_2 \text{ aliment}} = 1.55 \text{ kmol Ca(OH)}_2 \text{ aliment/h}$$

$$n_{17 \text{ Ca(OH)}_2 \text{ sale}} = 1.55 - 0.70 = 0.85 \text{ kmol Ca(OH)}_2 * \frac{74 \text{ kg Ca(OH)}_2}{1 \text{ kmol Ca(OH)}_2}$$

$$m_{17 \text{ Ca(OH)}_2} = 62.9 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{h}$$

✓ EN EL RECICLO DEL REACTOR DE LACTIDA :



➤ BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO :

Con un recuperación del 25% de ácido láctico

$$m_{17 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} + m_{26 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = m_{18 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3}$$

$$m_{17 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = 2367.3 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

$$m_{26 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = 2367.3 * 0.25 = 603.5 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

$$m_{18 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = 2367.3 + 603.5 = 2970.8 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

➤ BALANCE DE  $\text{H}_2\text{O}$  :

Con un recuperación del 30 % de  $\text{H}_2\text{O}$ :

$$m_{17 \text{ H}_2\text{O}} + m_{26 \text{ H}_2\text{O}} = m_{18 \text{ H}_2\text{O}}$$

$$m_{17 \text{ H}_2\text{O}} = 16638.5 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

$$m_{26 \text{ H}_2\text{O}} = 16638.5 * 0.3 = 4987.9 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

$$m_{18 \text{ H}_2\text{O}} = 16638.5 + 4987.9 = 21626.4 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

➤ BALANCE DE  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :

$$m_{17 \text{ H}_2\text{SO}_4} = m_{18 \text{ H}_2\text{SO}_4} = 293.0 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{h}$$

➤ BALANCE DE  $\text{Ca(OH)}_2$ :

$$m_{17 \text{ Ca(OH)}_2} = m_{18 \text{ Ca(OH)}_2} = 62.9 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{h}$$

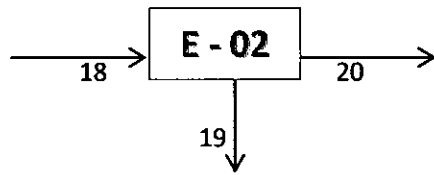
➤ BALANCE DE  $\text{CaSO}_4$  :

$$m_{17 \text{ CaSO}_4} = m_{18 \text{ CaSO}_4} = 1194.1 \text{ kg CaSO}_4/\text{h}$$

➤ BALANCE DE LACTATO DE CALCIO :

$$m_{17 (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}} = m_{18 (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}} = 167.9 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} / \text{h}$$

✓ FILTRO ROTATORIO:



➤ **BALANCE DE  $\text{CaSO}_4$ :**

$$m_{18} \text{ CaSO}_4 = m_{19} \text{ CaSO}_4$$

$$m_{19} \text{ CaSO}_4 = 1194.1 \text{ kg CaSO}_4/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :**

$$m_{18} \text{ H}_2\text{SO}_4 = m_{20} \text{ H}_2\text{SO}_4 = 293.0 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE  $\text{H}_2\text{O}$ :**

$$m_{18} \text{ H}_2\text{O} = m_{20} \text{ H}_2\text{O} = 21626.4 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

➤ **BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO:**

$$m_{18} \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 = m_{20} \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 = 2970.8 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

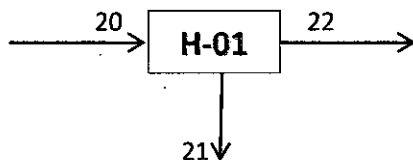
➤ **BALANCE DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :**

$$m_{18} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = m_{20} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = 62.9 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE LACTATO DE CALCIO :**

$$m_{18} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = m_{20} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = 167.9 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} / \text{h}$$

✓ BALANCE EN EL DECANTADOR :



➤ **BALANCE DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  : E = S**

$$m_{20} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = m_{21} \text{ Ca}(\text{OH})_2 = 62.9 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE LACTATO DE CALCIO :**

$$m_{20} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = m_{21} (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} = 167.9 \text{ kg } (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca} / \text{h}$$

➤ **BALANCE DE  $\text{H}_2\text{O}$ :** La operación con un 99.5% de eficiencia, la cantidades separadas se encuentra con un 0.5% de humedad

$$m_{21} \text{ H}_2\text{O} = m_{20} \text{ H}_2\text{O} * 0.005 = 21626.4 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h} * 0.005 = 108.1 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

$$m_{22} \text{ H}_2\text{O} = 21626.4 - 108.1 = 21518.3 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

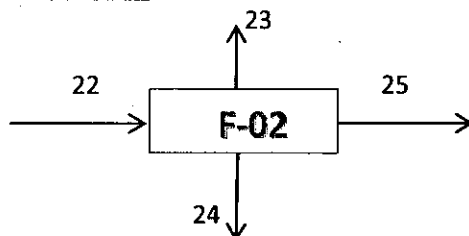
➤ **BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO: E = S**

$$m_{20} \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 = m_{22} \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 = 2970.8 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

➤ **BALANCE DE  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :**

$$m_{20} \text{ H}_2\text{SO}_4 = m_{22} \text{ H}_2\text{SO}_4 = 293.0 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{h}$$

✓ BALANCE DEL EVAPORADOR DE ACIDO LACTICO:



➤ BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO :

$$m_{22 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = m_{25 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = 2970.8 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

➤ BALANCE DE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

$$m_{22 \text{ H}_2\text{SO}_4} = m_{24 \text{ H}_2\text{SO}_4} = 293.0 \text{ kg H}_2\text{SO}_4/\text{h}$$

➤ BALANCE DE H<sub>2</sub>O: En el evaporador se evapora un 80% en relación con alimentación con ácido láctico para concentrarlo en mayor porcentaje.

$$m_{23 \text{ H}_2\text{O}} = 0.80 m_{22 \text{ H}_2\text{O}}$$

$$m_{25 \text{ H}_2\text{O}} = 0.20 m_{22 \text{ H}_2\text{O}}$$

Pero:

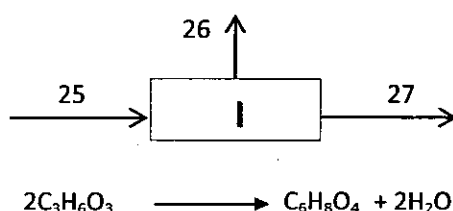
$$m_{22} = 21518.3 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

$$m_{25 \text{ H}_2\text{O}} = 0.20 * 21518.3$$

$$m_{25 \text{ H}_2\text{O}} = 4303.7 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h}$$

$$m_{23} = 0.8 * 21521.9 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{h} = 17214.6 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{h}$$

✓ REACTOR DE PREPOLIMERIZACIÓN LACTIDA:



La conversión en el reactor de prepolimerización es de 80 %, para la obtención del dímero Lactida.

➤ BALANCE DE ÁCIDO LÁCTICO C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>: E = S + C

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 \text{ aliment}} = 2970.8 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3 * \frac{1 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3}{90.08 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3} = 32.98 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 \text{ cons}} = 32.98 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3 * 0.80 = 26.38 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

$$n_{26 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 \text{ sale}} = 6.60 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3 * \frac{90.08 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3}{1 \text{ kmol C}_3\text{H}_6\text{O}_3}$$

$$m_{26 \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 \text{ sale}} = 2376.6 \text{ kg C}_3\text{H}_6\text{O}_3/\text{h}$$

➤ BALANCE DE  $C_6H_8O_4$ :  $G = S$

El porcentaje de eficiencia del reactor de prepolimerización es del 88.6%

$$n_{C_6H_8O_4} \text{ generad.} = (n_{C_6H_8O_4}) \text{ sale} = 26.38 \text{ kmol } C_3H_6O_3(c) * \frac{1 \text{ kmol } C_6H_8O_4 (E)}{2 \text{ kmol } C_3H_6O_3(c)} * 0.886$$

$$n_{C_6H_8O_4} \text{ generad} = 11.69 \text{ Kmol } C_6H_8O_4 \text{ generad. /h}$$

$$m_{27 \text{ } C_3H_6O_3} \text{ sale} = 11.69 \text{ Kmol } C_6H_8O_4 * \frac{144 \text{ kg } C_6H_8O_4}{1 \text{ kmol } C_6H_8O_4}$$

$$m_{27 \text{ } C_3H_6O_3} \text{ sale} = 1683.1 \text{ kg } C_6H_8O_4/h$$

➤ BALANCE DE  $H_2O$ :  $E + G = S$

El porcentaje de recuperación del agua es del 4.9% respecto a la alimentación.

$$n_{H_2O} \text{ gener} = \frac{2 \text{ kmol } H_2O (g)}{2 \text{ kmol } C_3H_6O_3(c)} * 26.38 \text{ kmol } C_3H_6O_3(c)$$

$$n_{H_2O} \text{ gener} = 26.38 \text{ kmol } H_2O \text{ generado/h}$$

$$n_{25 \text{ } H_2O} \text{ aliment} = \frac{1 \text{ kmol } H_2O}{18 \text{ kg } H_2O} * 4303.7 \text{ kg } H_2O$$

$$n_{25 \text{ } H_2O} \text{ aliment} = 239.1 \text{ kmol } H_2O/h$$

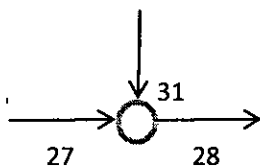
$$n_{26 \text{ } H_2O} \text{ sale} = 239.1 + 26.38 = 265.47 \text{ kmol } H_2O/h$$

$$n_{26 \text{ } H_2O} \text{ sale} = 265.47 \text{ kmol } H_2O * \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol } H_2O}$$

$$m_{26 \text{ } H_2O} = 4778.5 \text{ kg } H_2O/h$$

✓ EN EL RECICLO DEL REACTOR DE POLIMERIZACIÓN:

Con una recuperación de recirculación en 40% del dímero lactida



➤ Balance de  $C_6H_8O_4$ :  $E = S$

$$m_{27 \text{ LACTIDA}} + m_{31 \text{ LACTIDA}} = m_{28 \text{ LACTIDA}}$$

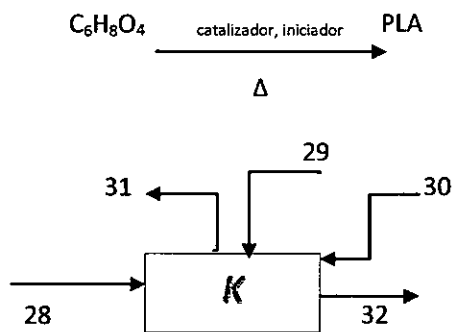
$$m_{31 \text{ LACTIDA}} = 0.4 * m_{28}$$

$$m_{27 \text{ LACTIDA}} = 0.6 * m_{28}$$

$$m_{28} = 1683.1 / 0.6 = 2805.2 \text{ kg } C_6H_8O_4/h$$

$$m_{31 \text{ LACTIDA}} = 2805.2 * 0.4 = 1122.1 \text{ kg } C_6H_8O_4/h$$

✓ **REACTOR DE POLIMERIZACIÓN:**



El PM del polímero PLA va ser el más alto de 20000 kg/kmol

➤ Balance de Biopolímero PLA:  $G = S$

$$n_{32 \text{ PLA}} = 19656 \text{ kg PLA} \cdot \frac{1 \text{ kmol PLA}}{20000 \text{ kg PLA}} = 0.98 \text{ kmol PLA/h}$$

$$m_{32 \text{ PLA}} = 19656 \text{ kg PLA/h}$$

➤ Balance de LACTIDA ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4$ ):  $E = S + C$

$$m_{\text{cons}} = 3336.2 - 1683.1 = 1683.1 \text{ kg C}_6\text{H}_8\text{O}_4/\text{h}$$

$$(n_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4})_{\text{cons}} = \frac{1 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4_{\text{cons}}}{144 \text{ kg C}_6\text{H}_8\text{O}_4} \cdot 1683.1 \text{ kg C}_6\text{H}_8\text{O}_4/\text{h}$$

$$(n_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4})_{\text{cons}} = 11.7 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4/\text{h}$$

La conversión del dímero lactida al biopolímero PLA en reactor de polimerización es del 57%:

$$n_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4 \text{ aliment}} = \frac{1 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4_{\text{aliment}}}{0.57 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4_{\text{cons}}} \cdot 0.95 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4 \cdot 11.7 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4_{\text{cons}}/\text{h}$$

$$n_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4 \text{ aliment}} = 19.5 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4/\text{h}$$

$$n_{31} = 19.5 - 11.7 = 7.8 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4$$

$$m_{31} = 7.8 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4 \cdot \frac{144 \text{ kg C}_6\text{H}_8\text{O}_4}{1 \text{ kmol C}_6\text{H}_8\text{O}_4} = 1122.1 \text{ kg C}_6\text{H}_8\text{O}_4/\text{h}$$

Se produce esteroisómero de ácido láctico consiste de 99.5% del isómero  $\text{L}^{(-)}$  y 0.5% del isómero  $\text{D}^{(+)}$ .

$$m_{28 \text{ L}^{(-)} \text{ LACTIDA}} = 2093.4 \text{ kg L- LACTIDA/h}$$

$$m_{28 \text{ D}^{(+)} \text{ LACTIDA}} = 10.5 \text{ kg D- LACTIDA/h}$$

➤ Balance de CATALIZADOR ( $\text{C}_{16}\text{H}_{30}\text{O}_4\text{Sn}$ ):  $E = S$

Con la relación del catalizador octoato de estaño a una concentración de 5.0% en peso respecto al iniciador de alcohol isopropílico se obtendrá:

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} = 0.05 \cdot m_{30 \text{ INICIADOR}}$$

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} + m_{30 \text{ INICIADOR}} = m_{31} + m_{32} - m_{28}$$

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} + m_{30 \text{ INICIADOR}} = 1122.1 + 19656 + 0.05 \cdot m_{30 \text{ INICIADOR}} - 2805.2$$

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} + 0.95 \cdot m_{30 \text{ INICIADOR}} = 17972.9 \text{ kg/h}$$



$$0.05 * m_{30 \text{ INICIADOR}} + 0.95 * m_{30 \text{ INICIADOR}} = 17972.9 \text{ kg/h}$$

$$m_{30 \text{ INICIADOR}} = 17972.9 \text{ kg INICIADOR/h}$$

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} = 855.9 \text{ kg CATALIZADOR/h}$$

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} = m_{32 \text{ CATALIZADOR}} = 855.9 \text{ kg CATALIZADOR/h}$$

$$\text{Concentración catalizador} = 855.9 \text{ kg CATALIZADOR} / 17972.9 \text{ kg INICIADOR}$$

$$\text{Concentración catalizador} = 5.0 \% \text{ catalizador octoato de estaño}$$

➤ Balance de INICIADOR ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ):  $E = C$

La concentración del iniciador alcohol isopropílico es del 10%

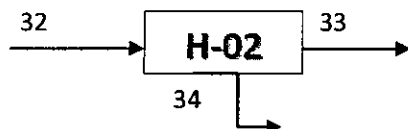
$$m_{30 \text{ INICIADOR}} = 17972.9 \text{ kg/h}$$

$$\text{Concentración iniciador} = m_{28} / m_{31} + m_{32}$$

$$\text{Concentración iniciador} = 2805.2 / (1122.1 + 19656)$$

$$\text{Concentración iniciador} = 10.0 \% \text{ iniciador alcohol isopropílico}$$

#### ✓ DECANTADOR RECUPERACIÓN DEL CATALIZADOR



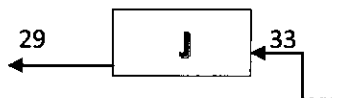
➤ Balance de CATALIZADOR ( $\text{C}_{16}\text{H}_{30}\text{O}_4\text{Sn}$ ):  $E = S$

$$m_{32 \text{ CATALIZADOR}} = m_{34 \text{ CATALIZADOR}} = 855.9 \text{ kg CATALIZADOR/h}$$

➤ Balance de PLA:  $E = S$

$$m_{32 \text{ BIOPOLÍMERO PLA}} = m_{33 \text{ BIOLÍMERO PLA}} = 19656 \text{ kg PLA/h}$$

#### ✓ TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL CATALIZADOR



➤ Balance de CATALIZADOR ( $\text{C}_{16}\text{H}_{30}\text{O}_4\text{Sn}$ ):  $E = S$

$$m_{33 \text{ CATALIZADOR}} = m_{29 \text{ CATALIZADOR}} = 855.9 \text{ kg CATALIZADOR/h}$$

#### **LEYENDA DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO PLA:**

A: PREFILTRADO

B: CENTRIFUGADO

C: ULTRAFILTRACIÓN – DIAFILTRACIÓN

D-01: FERMENTADOR - NEUTRALIZADOR

E-01, E-02: FILTROS ROTATORIOS I y II

F-01, F-02: EVAPORADORES I y II

G: REACTOR DE ACIDULACION

H-01, H-02: DECANTADOR I y II

I: REACTOR DE PREPOLIMERIZACIÓN LACTIDA.

J: TANQUE ALMACENAMIENTO CATALIZADOR OCTOATO DE ESTAÑO

K: REACTOR DE POLIMERIZACIÓN ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

L: TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE PLA.

## DISEÑO DE EQUIPOS PRINCIPALES Y AUXILIARES DEL PROCESO

## 7.1 EQUIPOS PRINCIPALES:

## 7.1.1 DISEÑO DEL FERMENTADOR- NEUTRALIZADOR

## ✓ FUNCIÓN

La función principal de los fermentadores es degradar la materia orgánica por medio de microorganismos, en este caso la azúcar lactosa por reacciones bacteriológicas se convierte a ácido láctico. En este proceso la fermentación es anaerobia, es decir, se lleva a cabo sin presencia de aire. Se procede a preparar el inóculo el cual representa el 5% del volumen total de la carga y así dar inicio a la fermentación. Dicha etapa toma 42-48 horas en concluirse y se mantendrá a una temperatura constante de 48°C (118°F).

## ✓ VOLUMEN DEL FERMENTADOR-NEUTRALIZADOR

Según nuestro diagrama utilizaremos tres fermentadores-neutralizadores donde ingresará un flujo másico de solución de 7034 kg/h obtenido por el balance de materia, a esta cantidad se le agrega el 5% en volumen de inóculo.

Datos:

$$\rho_{promedio} = 0.045 \cdot 1666 + 0.887 \cdot 1000 + 0.031 \cdot 1035 + 0.037 \cdot 2211$$

$$\rho_{promedio} = 1076 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 26177.8 / 3 = 8726 \text{ kg/h (por cada fermentador)}$$

$$v = \frac{8726 \text{ kg/h}}{1076 \text{ kg/m}^3} = 8.11 \text{ m}^3/\text{h}, \tau = 48 \text{ h (tiempo de fermentación)}$$

$$\tau = \frac{V}{v} \text{ (Para fluidos, tanque modelo CSTR)}$$

$$V_R = 48 \text{ h} \cdot 8.11 \text{ m}^3/\text{h} = 389 \text{ m}^3$$

Por la línea del tiempo que dura la fermentación se determina que se utilizarán 3 fermentadores-neutralizadores en serie a una conversión final del 98%. A esto se le sumara el 5% (V/V) del inóculo y un 20% de seguridad mencionado anteriormente y nos queda:

$$V_{\text{fermentador}} = 389 \cdot 1.05 \cdot 1.20 = 490 \text{ m}^3 = 17302 \text{ pie}^3$$

## ✓ DIMENSIONES DEL FERMENTADOR-NEUTRALIZADOR

Si empleamos el criterio de las dimensiones generales según la Norma DIN 28131 es  $L/D = 2$  las dimensiones de los fermentadores que se obtiene será:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot L$$

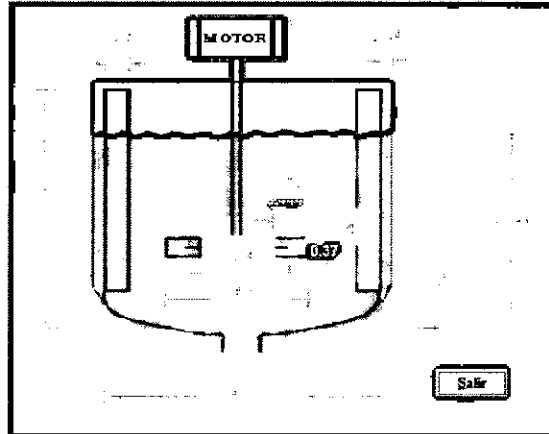
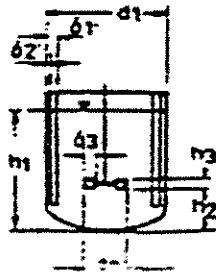
Sustituyendo  $L$  en la ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * (2D) = 0.5 \pi D^3$$

$$490 = 0.50 * \pi * D^3$$

$$D_1 = 6.8 \text{ m} = 22.3 \text{ pie}$$

$$L = h_1 = 13.6 \text{ m} = 44.6 \text{ pie}$$



Según la tabla:

$$d_2 = 0.33 * d_1 = 2.24 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.33 * d_1 = 2.24 \text{ m}$$

$$h_3 = 0.20 * d_2 = 0.45 \text{ m}$$

$$\delta_1 = 0.10 * d_1 = 0.68 \text{ m}$$

$$\delta_2 = 0.02 * d_1 = 0.136 \text{ m}$$

$$\delta_3 = 0.25 * d_2 = 0.56 \text{ m}$$

#### ✓ BALANCE DE ENERGÍA EN EL FERMENTADOR-NEUTRALIZADOR

$$Q = \Delta H$$

$$T \text{ referencia} = 18^\circ\text{C} = 291^\circ\text{K}, P = 1 \text{ atm}$$

$$T \text{ operación} = 48^\circ\text{C} = 321^\circ\text{K}, P = 2 \text{ atm}$$

	ENTRADA		SALIDA	
	Flujo molar	$\hat{H}$ entrada	Flujo molar	$\hat{H}$ salida
SUSTANCIA	kmol/h	KJ/kmol	kmol/h	KJ/kmol
$C_{12}H_{22}O_{11}$	3.56	$\hat{H}_6$	----	----
$H_2O$	1336.44	$\hat{H}_7$	1293.29	$\hat{H}_1$
$(C_3H_5O_3)_2Ca$	----	----	5.25	$\hat{H}_2$
$Ca(OH)_2$	6.71	$\hat{H}_8$	1.90	$\hat{H}_3$
BIOMASA NO FERMENTADA	----	----	1.13	$\hat{H}_4$
$C_3H_6O_3$	----	----	17.43	$\hat{H}_5$
INOCULO (5 %V/V)	4.60	$\hat{H}_9$	----	----

Los valores de entalpía de formación y de Cp se obtendrán del libro Chemical Properties, HandBook donde se encuentran propiedades físicas de los compuestos.

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$\Delta H = \sum n_r \Delta \hat{H}_f^\circ - \sum n_r \Delta \hat{H}_f^\circ + \sum n_r \Delta \hat{H} - \sum n_r \Delta \hat{H}$$

PRODUCTO      REACTIVO      SALIDA      ENTRADA

$$\dot{H}_1 = \int_{298\text{ K}}^{321\text{ K}} (C_p \text{ H}_2\text{O}) dT$$

$$C_p \text{ H}_2\text{O} = 92.053 - 3.9953 \cdot 10^{-2} T - 2.1103 \cdot 10^{-4} T^2 + 5.3469 \cdot 10^{-7} T^3$$

$$\dot{H}_1 = 75.17 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_2 = \int_{298\text{ K}}^{321\text{ K}} (C_p (\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2\text{Ca}) dT = -7.34\text{E}+07 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_3 = \int_{298\text{ K}}^{321\text{ K}} (C_p \text{ Ca}(\text{OH})_2) dT = -2.435\text{E}+08 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_4 = \int_{298\text{ K}}^{321\text{ K}} (C_p \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) dT = -3.942\text{E}+07 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_5 = \int_{298\text{ K}}^{321\text{ K}} (C_p \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3) dT = -2.168\text{E}+07 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_6 = \int_{298\text{ K}}^{321\text{ K}} (C_p \text{ C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) dT = -3.887\text{E}+08 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_7 = \int_{291\text{ K}}^{298\text{ K}} (C_p \text{ H}_2\text{O}) dT = 529.5 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_8 = \int_{291\text{ K}}^{298\text{ K}} (\text{INOCULO } 5\% \text{ V/V}) dT = -3.919\text{E}+05 \text{ KJ/kmol}$$

$$\dot{H}_9 = \int_{291\text{ K}}^{298\text{ K}} (C_p \text{ Ca}(\text{OH})_2) dT = -1.453\text{E}+04 \text{ KJ/kmol}$$

$$\Delta \dot{H}_r = 4 \cdot \Delta \dot{H}_f^\circ \text{ C}_3\text{H}_6\text{O}_3 - 2 \cdot \Delta \dot{H}_f^\circ \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$$

$$\Delta \dot{H}_r = 4 \text{ mol} \cdot (-694.4 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}) - 2 \text{ mol} \cdot (-1274.6 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}) = -228.4 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta \dot{H}_r = -2.284\text{E}+05 \text{ KJ/kmol}$$

$$Q = \Delta H - 2.284\text{E}+05 + (-1.075\text{E}+07)$$

$$Q = \Delta H = -1.098\text{E}+07 \text{ KJ/h} = -1.041\text{E}+07 \text{ BTU/h} \quad (\text{Rx. EXOTÉRMICA})$$

#### ✓ DISEÑO DE AGITACIÓN:

La potencia (P) de agitación es una función de las variables:

$$P = \Psi (N, D, \mu, \rho)$$

$$Re = \frac{N \cdot \rho \cdot D^2}{\mu} = \frac{4.17 \cdot \frac{1076 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot 2.24^2 \text{ m}^2}{0.01 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 2.25 \cdot 10^6$$

El régimen del flujo es turbulento. Con el diagrama obtenemos  $N_p$  vs  $Re$  ( $2.25 \cdot 10^6$ ) = 32 Para calcular la potencia de motor para funcionamiento del agitador es:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5}, \text{ despejando } P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$$

$P = 32 \cdot 1076 \text{ kg/m}^3 \cdot (4.17)^3 \cdot 6.8^5 = 3630 \text{ Kw} = 4868 \text{ hP}$  (potencia teórica del motor). La eficiencia del motor es del 85%.

$$P_{\text{necesar}} = \frac{P_{\text{teorica}}}{\eta} = \frac{3630}{0.85} = 4270 \text{ kw} = 5726 \text{ hP} \text{ (potencia real del motor)}$$

Calcular el tiempo de mezcla (diagrama  $Re$  vs  $N_{tm}$ )  $Re = 2.25 \cdot 10^6$ . Con el diagrama obtenemos  $N_{tm} = 374.4$

$$t_m = \frac{374.4}{4.17} = 89.78 \text{ s}$$

### 7.1.2 DISEÑO DEL REACTOR DE ACIDULACIÓN

#### ✓ VOLUMEN DEL LÍQUIDO

$$\rho_{\text{sol}} = 1197.1 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{\text{sol}} = \frac{19135.2 \text{ kg/h}}{1197.1 \text{ kg/m}^3} = 15.98 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$v_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{1588.5 \text{ kg/h}}{1819.7 \text{ kg/m}^3} = 0.87 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{líquido}} = 2\text{h} * 15.98 \text{ m}^3/\text{h} + 2\text{h} * 0.87 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{líquido}} = 33.7 \text{ m}^3$$

#### ✓ VOLUMEN DE DISEÑO

Al volumen del diseño del reactor de acidulación se le sumara 20% de seguridad.

$$V_{\text{diseño}} = 33.7 * 1.20 = 40.44 \text{ m}^3$$

#### ✓ DIMENSIONES DEL REACTOR ACIDULADOR

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * L$$

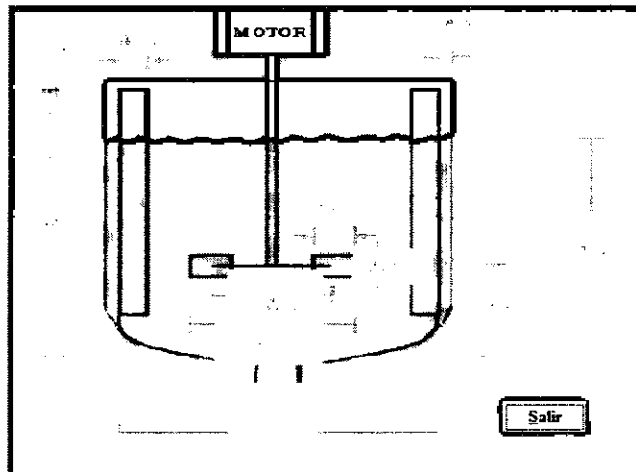
Sustituyendo L en la ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * (2D) = 0.5\pi D^3$$

$$40.44 = 0.50 \pi D^3$$

$$D_1 = 2.95 \text{ m} = 9.7 \text{ pie}$$

$$L = h_1 = 5.91 \text{ m} = 19.4 \text{ pie}$$



#### ✓ ESPESOR DE DISEÑO PARA EL REACTOR ACIDULADOR

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho * g * H_{\text{liq}} = (1197 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 5.91 \text{ m}) / 1000 = 69.4 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 10.1 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

$$P_{\text{agitación}} = 0.30 * P_{\text{hidrostática}} = 0.30 * 10.1 = 3.03 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

$$\text{Dato: } P_{\text{atm}} = 552 \text{ mm Hg} = 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} \text{ (Presión atmosférica en Cajamarca)}$$

$$P_{\text{dis.}} = (10.1 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} + 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2} + 3.03 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}) * 1.2 = 16.6 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$$

✓ **ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):**

El espesor de diseño para el casco se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{P_{dis} \cdot D}{2.5 \cdot E - 1.2 \cdot P} + c \quad (\text{Rase Barow, Pág. 239})$$

P dis = 16.6 lb/pulg<sup>2</sup>

D = 116.4 plg

S= 18750 lb/pulg<sup>2</sup> (esfuerzo de tensión, acero inoxidable tipo 316) P& T pág. 498.

E=Factor de soldadura (soldadura en X y radiografiado en los puntos de soldadura, 0.85).

c= tolerancia a la corrosión= 0.125 plg.

Sustituyendo la ecuación:

$$t_d = \frac{16.6 \cdot 116.4}{2 \cdot 18750 \cdot 0.85 - 1.2 \cdot 16.6} + 0.125 = 0.186 \text{ plg} = 4.72 \text{ mm}$$

Se especifica un material de acero inoxidable 316 de 1" espesor para la cubierta del reactor de acidulación (P & T pág. 498).

✓ **ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)**

El espesor de los cabezales o fondo de los tanques se calcula según la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{P_{dis} \cdot D}{4 \cdot S \cdot E - 0.4 \cdot P} + c \quad (\text{Rase Barow, p 239})$$

Pdis= 16.6 lb/plg<sup>2</sup>

D= 116.4 plg

S = 18750 lb/plg<sup>2</sup> (esfuerzo de tensión, acero inoxidable 316) P& T pág. 498

E=Factor de soldadura (soldadura en X y radiografiado en los puntos de soldadura, 0.85).

c= tolerancia a la corrosión= 0.125 plg.

Sustituyendo la ecuación:

$$t_c = \frac{16.6 \cdot 116.4}{4 \cdot 18750 \cdot 0.85 - 0.4 \cdot 16.6} + 0.125 = 0.156 \text{ plg} = 3.96 \text{ mm}$$

Se especifica un cabezal hemisférico superior de 3/4" y cabezal hemisférico superior de 3/4" de acero inoxidable 314 (P & T pág. 498).

✓ **BALANCE DE ENERGÍA EN EL REACTOR DE ACIDULACIÓN:**

Q = ΔH

T referencia = 25°C = 298°K, P = 1 atm

T operación = 48°C = 321°K, P = 2 atm

	ENTRADA		SALIDA	
	moles (n)	Ĥ entrada	moles (n)	Ĥ salida
SUSTANCIA	kmol/h	KJ/kmol	kmol/h	KJ/kmol
H <sub>2</sub> O	335.54	-1.301E+08	947.32	Ĥ 1
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	6.54	-2.550E+06	2.89	Ĥ 2
Ca(OH) <sub>2</sub>	0.69	-2.690E+05	0.96	Ĥ 3
(C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ca	1.73	-1.381E+06	0.96	Ĥ 4
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	17.64	-1.55E+07	2.89	Ĥ 5
CaSO <sub>4</sub>	-----	-----	8.68	Ĥ 6

Los valores de entalpía de formación y de Cp se obtendrán del libro Chemical Properties, HandBook donde se encuentran propiedades físicas de los compuestos.

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$\Delta H = \sum n_i \Delta \hat{H}_f^\circ - \sum n_i \Delta \hat{H}_f^\circ + \sum n_i \Delta \hat{H} - \sum n_i \Delta \hat{H}$$

PRODUCTO REACTIVO SALIDA ENTRADA

$$\hat{H}_1 = \int_{298 K}^{321 K} (H_2O) dT = -2.787E+08 \text{ KJ/kmol} \quad \hat{H}_4 = \int_{298 K}^{321 K} ((C_3H_5O_3)_2Ca) dT = -2.824E+05 \text{ KJ/kmol}$$

$$\hat{H}_2 = \int_{298 K}^{321 K} (C_3H_6O_3) dT = -8.502E+05 \text{ KJ/kmol} \quad \hat{H}_5 = \int_{298 K}^{321 K} (H_2SO_4) dT = -8.502E+05 \text{ KJ/kmol}$$

$$\hat{H}_3 = \int_{298 K}^{321 K} (Ca(OH)_2) dT = -2.824E+05 \text{ KJ/kmol} \quad \hat{H}_6 = \int_{298 K}^{321 K} (CaSO_4) dT = -2.531 \text{ KJ/kmol}$$

$$\Delta \hat{H}_r = 2 * \Delta \hat{H}_f C_3H_6O_3 + 1 * \Delta \hat{H}_f CaSO_4 - (1 * \Delta \hat{H}_f (C_3H_5O_3)_2Ca + 1 * \Delta \hat{H}_f H_2SO_4)$$

$$\Delta \hat{H}_r = 2 \text{ mol} * (-694.4 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}) + 1 \text{ mol} * (-1434.5 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}) - (1 \text{ mol} * (-686.8 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}) + 1 \text{ mol} * (-814 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}))$$

$$\Delta \hat{H}_r = -1322.5 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$Q = \Delta H = -1322.5 + ((-2.835E+08) - (-1.553E+07) + (-1.343E+08))$$

$$Q = -1.323E+03 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} \quad (\text{Rx. EXOTÉRMICA})$$

✓ DISEÑO DE AGITACIÓN:

Hallando el  $N_{Re}$  del fluido en el reactor de acidulación, cuyos parámetros obtenidos son:

$$N = 90 \text{ rpm} = 1.5 \text{ s}^{-1}$$

$$\rho = 1066.9 \text{ kg/m}^3$$

$$d_2 = 0.97 \text{ m}$$

$$\mu = 0.0158 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$Re = \frac{N * \rho * D^2}{\mu} = \frac{1.5 * \frac{1066.9 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 0.97^2 \text{ m}^2}{0.0158 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 95301 = 9.53 * 10^4$$

El régimen del flujo es turbulento. Con el diagrama obtenemos  $N_p$  vs  $Re$  ( $9.53 * 10^4$ ) = 15.4 Para calcular la potencia de motor para funcionamiento del agitador es:

$$N_p = \frac{P}{\rho * N^3 * D^5}, \text{ despejando } P = N_p * \rho * N^3 * D^5$$

$$P = 15.4 * 1066.9 \text{ kg/m}^3 * (1.5)^3 \text{ s}^{-3} * 0.97^5 = 4762 \text{ kW (potencia teórica del motor). La eficiencia del motor es del 85\%.$$

$$P_{necesaria} = \frac{P_{teorica}}{\eta} = \frac{4762}{0.85} = 5602 \text{ kw} = 7512 \text{ hP (potencia real del motor)}$$

Calcular el tiempo de mezcla (diagrama  $Re$  vs  $N_{tm}$ ),  $Re = 9.53 * 10^4$

Con el diagrama obtenemos  $N_{tm} = 77$

$$t_m = \frac{77}{1.5} = 51 \text{ s}$$



### ✓ DISEÑO DE CHAQUETA

Considerando los siguientes parámetros:

$$L_{\text{agitador}} = \frac{38.19 \text{ pulg}}{12} = 3.18 \text{ pie}$$

$$N = 90 * 60 = 5400 \text{ rev/h}$$

$$\rho_{\text{sol}} = 66.46 \text{ lb/pie}^3$$

$$\text{A una Temperatura de } 77^\circ\text{F}, \mu = 1.46 \text{ cp} * 2.42 = 3.53 \text{ lb/pie}^2\cdot\text{h}$$

$$k = 0.541 \text{ BTU/h}^2\cdot\text{pie}^2 \text{ (}^\circ\text{F/pie)}$$

$$C_p = 1.53 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$$

$$Re_j = \frac{L^2 * N * \rho}{\mu} = \frac{3.18^2 * 5400 * 66.46}{3.53} = 1028096$$

De la figura 20.2 Donald Kern para transferencia de calor de chaquetas y serpentines:

$$JH = 3193 = \frac{h_j * D_j}{K} * \left(\frac{C * \mu}{K}\right)^{-1/3} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14}$$

$$\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} = 1$$

$$D_j = \frac{116.4 \text{ pulg}}{12} \text{ (diámetro del reactor)}$$

$$D_j = 9.7 \text{ pie}$$

$$NPr = \left(\frac{C_p * \mu}{k}\right)^{1/3} = \left(\frac{1.53 * 3.53}{0.541}\right)^{1/3} = 2.15$$

#### COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO:

$$h_j = JH * \frac{K}{D_j} * \left(\frac{C * \mu}{K}\right)^{1/3} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

$$h_j = 3193 * \frac{0.541}{9.7} (2.15) * (1) = 383 \frac{\text{BTU}}{\text{h}^2\cdot\text{pie}^2\cdot\text{F}}$$

#### COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO:

Para calcular el coeficiente convectivo externo utilizando la chaqueta se utiliza la siguiente ecuación:

$$Ho_c = \frac{Ka}{Dt_{ext}} * 0.54 * \left(\frac{Dt_{ext} * V * \rho}{\mu a}\right)^{0.8} * \left(\frac{C_p a * \mu a}{Ka}\right)^{1/3} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

FUENTE: Geankoplis, Christie J. Procesos de transporte y operaciones unitarias Pág. 337

$$h_{oc} = \frac{0.34}{9.7} * 0.54 * \left(\frac{9.7 * 1480 * 62.4}{2.178}\right)^{0.8} * \left(\frac{1 * 2.178}{0.34}\right)^{1/3} * (1)^{0.14}$$

$$h_{oc} = 1182 \text{ BTU/pie}^2\cdot\text{h}^\circ\text{F}$$

Usando la superficie interna como referencia:

$$U_c = \frac{h_j * h_{oc}}{h_j + h_{oc}} = \frac{383 * 1182}{383 + 1182} = 289 \text{ BTU/pie}^2\cdot\text{h}^\circ\text{F}$$

$$R_d = 0.005$$

$$hd = \frac{1}{R_d} = \frac{1}{0.005} = 200$$

$$\frac{1}{UD} = \frac{1}{U_c} + R_d$$

$$U_d = \frac{U_c + h_d}{U_c + h_d} = \frac{289 + 200}{289 + 200} = 118.2 \text{ BTU/h} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$U_c > U_d$ : si cumple

Para calcular el área de transferencia de calor de la chaqueta, consideramos el fondo como una placa plana, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Ach = \frac{\pi D_j^2}{4} + \pi \cdot D_j \cdot H$$

Ach = área total de transferencia de calor para la chaqueta.

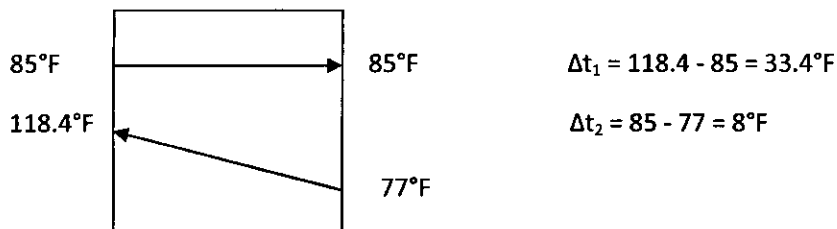
$D_j$ : diámetro del reactor de acidulación.

H: altura del líquido.

$$Ach = \frac{\pi (2.95)^2}{4} + \pi \cdot 2.95 \cdot 4.72 = 50.6 \text{ m}^2 = 544.4 \text{ pie}^2 \text{ (Área de la chaqueta)}$$

$$Q = U_d \cdot A \cdot \text{MLDT} \text{ (Balance de calor)}$$

DIAGRAMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR:



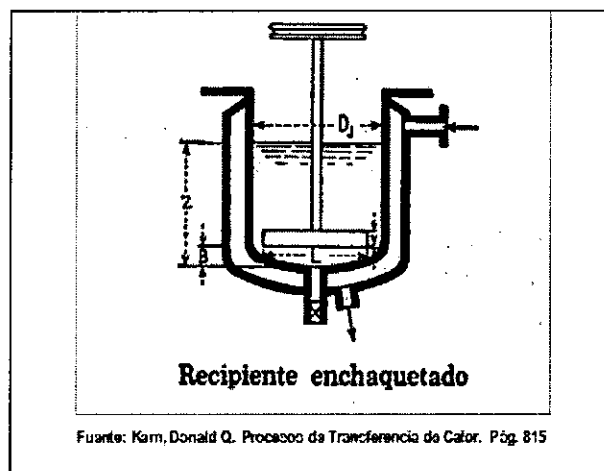
$$\text{MLDT} = \frac{33.4 - 8}{\ln\left(\frac{33.4}{8}\right)} = 17.8^\circ\text{F}$$

$$Q_s = 118.2 \cdot 544.4 \cdot 17.8 = 1145395 \text{ BTU/h}$$

$$Q_e = m \cdot c_p \cdot \Delta t$$

$$1145395 \text{ BTU/h} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1.0 \text{ BTU/lb} \cdot ^\circ\text{F} \cdot (118.4 - 77)^\circ\text{F}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 27666 \text{ lb/h} = 12575 \text{ kg/h} \text{ (Cantidad de agua que utilizaremos como refrigerante)}$$



### 7.1.3 DISEÑO DEL REACTOR DE LACTIDA

El reactor de lactida opera en condiciones de vacío de 500 mmHg a una temperatura de 180°C para formar lactida y agua, el tiempo del proceso es 15 h y tiene una conversión de 85-90% donde el ácido sin reaccionar es recuperado y recirculado.

#### ✓ VOLUMEN DEL REACTOR

$$\tau = \frac{V}{v} \text{ (Para fluidos, tanque modelo CSTR)}$$

$$V_{\text{REACTOR}} = 15 \text{ h} * 4.03 \text{ m}^3/\text{h} = 60.4 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{DISEÑO}} = 60.4 \text{ m}^3 * 1.20 = 72 \text{ m}^3$$

#### ✓ DIMENSIONES DEL REACTOR DE LACTIDA

$$D_1 = 3.58 \text{ m} = 11.7 \text{ pie}$$

$$L = h_1 = 7.14 \text{ m} = 23.4 \text{ pie}$$

#### ✓ ESPESOR DE DISEÑO PARA EL REACTOR

$$P_{\text{hidrostática}} = 18.34 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$P_{\text{agitación}} = 30\% * P_{\text{hidrostática}} = 0.30 * 18.34 = 5.50 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

Dato: P absoluta = P atm – P vacío

$$P_{\text{absoluta}} = 760 \text{ mmHg} - 500 \text{ mmHg} = 260 \text{ mmHg} = 5.018 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$P_{\text{dis.}} = (18.34 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} + 5.018 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} + 5.50 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}) * 1.2 = 34.6 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

#### ✓ ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):

El espesor de diseño para el casco se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{P_{\text{dis}} * D}{2SE - 1.2 * P} + C \quad \text{(Rase Barrow, Pág. 239)}$$

$$P_{\text{dis}} = 34.6 \text{ lb/plg}^2$$

$$D = 140.4 \text{ plg}$$

$$S = 15700 \text{ lb/plg}^2 \text{ (esfuerzo de tensión, acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L)}$$

$$E = \text{Factor de soldadura (soldadura en X y radiografiado en los puntos de soldadura, 0.85).}$$

$$C = \text{tolerancia a la corrosión} = 0.125 \text{ plg.}$$

Sustituyendo la ecuación:

$$t_d = \frac{34.6 * 140.4}{2 * 15700 * 0.85 - 1.2 * 34.6} + 0.125 = 0.307 \text{ plg} = 7.8 \text{ mm}$$

Se especifica un material de acero inoxidable austenítico ASTM A240–304 L de 1/4" de espesor para la cubierta.

#### ✓ ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)

El espesor de los cabezales o fondo de los tanques se calcula según la siguiente ecuación:

Sustituyendo la ecuación:

$$t_c = \frac{34.6 * 140.4}{4 * 15700 * 0.85 - 0.4 * 34.6} + 0.125 = 0.216 \text{ plg} = 5.5 \text{ mm}$$

Se especifica un cabezal hemisférico superior de 1/8" y cabezal hemisférico inferior de 1/8" de acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L.

➤ **SISTEMA DE VACÍO:** Para lograr un vacío de 500 mmHg, según Rase –Barrow, es necesario usar eyectores de doble efecto con intercondensador accionados por aire.

➤ **SELECCIÓN RESISTENCIA ELÉCTRICA- BALANCE DE ENERGÍA:**

$$Q = \Delta H = -(\Delta H_{RX}) \cdot (-r \cdot V) + \sum_{\text{SALIDA}} n_i \Delta \hat{H} - \sum_{\text{ENTRADA}} n_i \Delta \hat{H}$$

$$-1.835E+08 = -(\Delta H_{RX}) \cdot (0.1895 \text{ L/mol} \cdot \text{h} \cdot 5.44 \text{ mol/L} \cdot 4.03 \cdot 10E+03 \text{ L}) + (-3.185E+08)$$

$$\Delta H_{RX \text{ } 180^\circ\text{C}} = -1.819 \cdot 10E+06 \text{ KJ/mol}$$

La constante cinética de la reacción de prepolimerización se obtiene de la cinética de la reacción obtenida anteriormente a una temperatura de reacción de 180°C es de  $k_2 = 0.1895 \text{ L/mol} \cdot \text{h}$ .

Entonces  $C_p = 0.475 \text{ BTU/lb} \cdot ^\circ\text{F}$ ,  $\lambda$  ácido láctico (212°F) = 63.16 BTU/lb,

$\lambda_{\text{vapor}} (212^\circ\text{F}) = 970.3 \text{ BTU/lb}$

$$Q = Q_{\text{sol}} + Q_{\text{evap}}$$

$$Q_{\text{sol}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T = 7274.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 2.2 \frac{\text{lb}}{\text{kg}} \cdot (356 - 176) ^\circ\text{F} = 2880702 \text{ BTU/h}$$

$$Q_{\text{evap}} = \lambda_v \cdot m_v + \lambda_{\text{lac}} \cdot m_{\text{lac}}$$

$$Q_{\text{evap}} = 970.3 \cdot 4303.7 \cdot 2.2 + 63.16 \cdot 2970.8 \cdot 2.2 = 9599735 \text{ BTU/h}$$

$$Q_{\text{total}} = 12480437 \text{ BTU/h}$$

$$\text{Energía consumida} = 12480437 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{10^{-3}}{9.486 \cdot 10^{-4} \text{ BTU/h}} = 3655 \text{ kW}$$

#### 7.1.4 DISEÑO DEL REACTOR DE POLIMERIZACIÓN

✓ **FUNCIÓN**

En este reactor se llevará a cabo la polimerización del monómero de lactida (lactona) por rompimiento de anillo (ROP) para formar el ácido poliláctico. La reacción es en fase heterogénea sólido-líquido por presencia de catalizador octoato de estaño en solución acuosa, con iniciador de alcohol isopropílico medio en suspensión.

✓ **VOLUMEN DE SOLUCIÓN**

$$m_{31 \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}} = 2805.2 \text{ kg C}_3\text{H}_8\text{O/h}, \rho_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}} = 785.0 \text{ kg/m}^3$$

En el reactor de polimerización se utilizará como catalizador octoato de estaño a una concentración de 5.0% en peso de monómero de lactida, entonces:

$$m_{29 \text{ CATALIZADOR}} = 855.9 \text{ kg/h}, \rho_{\text{catalizador de octoato de estaño}} = 1250 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{\text{sol}} = \frac{21634.0 \text{ kg/h}}{1250 \text{ kg/m}^3} = 17.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{liq}} = 17.3 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 7 \text{ h} = 121 \text{ m}^3$$

✓ **VOLUMEN DE DISEÑO**

Al volumen del diseño se le sumara 20% de seguridad es decir el 80% está cubierta con solución y el 20% vacío por seguridad:

$$V_{\text{diseño}} = 121/0.80 = 151.2 \text{ m}^3$$

### ✓ DIMENSIONES DEL REACTOR DE POLIMERIZACIÓN

Si empleamos el criterio según la Norma DIN 28131 la dimensión del reactor polimerización es  $L/D = 1.5$  que se obtiene será:

$$D_1 = 5.04 \text{ m} = 16.53 \text{ pie}$$

$$L = h_1 = 7.56 \text{ m} = 24.80 \text{ pie}$$

Según la tabla:

$$h_1 = 1.5 * d_1 = 1.5 * 5.04 = 7.56 \text{ m}$$

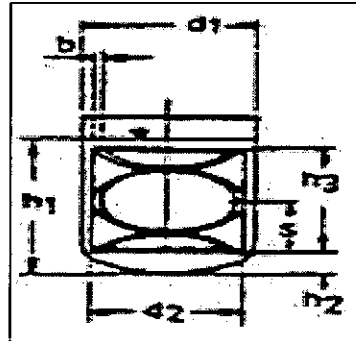
$$d_2 = 0.98 * d_1 = 0.98 * 5.04 = 4.94 \text{ m}$$

$$b = 0.10 * d_2 = 0.1 * 4.94 = 0.494 \text{ m}$$

$$h_3 = 1.0 * d_2 = 1.0 * 4.94 = 4.94 \text{ m}$$

$$s = 0.50 * d_2 = 0.50 * 4.94 = 2.47 \text{ m}$$

$$h_2 = 0.01 * d_1 = 0.01 * 5.04 = 0.0504 \text{ m}$$



### ✓ ESPESOR DE DISEÑO PARA EL REACTOR DE POLIMERIZACIÓN

$$P \text{ hidrostática} = \rho * g * H \text{ liq.} = 1250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 7.56 \text{ m} = 92704.5 \text{ Pa}$$

$$P \text{ hidrostática} = 13.3 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$P \text{ agitación} = 30\% * P \text{ hidrostática} = 0.30 * 13.3 = 4.0 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\text{Dato: } P \text{ atm} = 552 \text{ mm Hg} = 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \text{ (Presión atmosférica en Cajamarca)}$$

$$P \text{ dis.} = \left( 13.3 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} + 4.0 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} + 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \right) * 1.2 = 21.64 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

### ✓ ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):

Sustituyendo la ecuación:

$$t_d = \frac{21.64 * 198.36}{2 * 15700 * 0.85 - 1.2 * 21.64} + 0.125 = 0.286 \text{ plg} = 7.26 \text{ mm}$$

Se especifica un material de acero inoxidable austenítico AISI 317-L de 1/8" de espesor para la cubierta.

### ✓ ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)

Sustituyendo la ecuación:

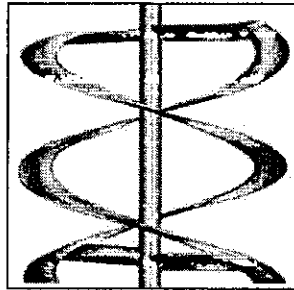
$$t_c = \frac{19.22 * 198.36}{4 * 15700 * 0.85 - 0.4 * 19.22} + 0.125 = 0.205 \text{ plg.} = 5.22 \text{ mm}$$

Se especifica un cabezal hemisférico superior de 1/8" y cabezal hemisférico inferior de 1/8" de acero inoxidable AISI 317-L.

### ✓ DISEÑO DE AGITACIÓN

Para el caso del reactor de polimerización, se elige un agitador de doble cinta helicoidal. La eficacia en aplicaciones de transmisión de calor es el doble como el de ancla, y para la homogenización, entre 5 y 10 veces mayor, factores que pueden reducir los costos de operación y el tiempo de proceso.

Agitador doble cinta helicoidal



Hallando el  $N_{Re}$  del fluido en el reactor de polimerización, los parámetros obtenidos son:

$$N = 90 \text{ rpm} = 1.5 \text{ s}^{-1}$$

$$\rho = 1250 \text{ kg/m}^3$$

$$D_1 = 5.04 \text{ m}$$

$$\mu = 25.5 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 25.5 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\nu = \rho/\mu = 1250/25.5 = 2.92 \cdot 10^{-2}$$

Calcular la potencia  $P_M$  en el caso del modelo:

$$Re_M = \frac{N_M \cdot d_{2,M}^2}{\nu} = \frac{1.5 \cdot 5.04^2 \text{ m}^2}{2.92 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 259$$

Con el diagrama ( $N_p - Re$ ) sacamos  $N_p$  ( $Re = 259$ ) = 13.5

$$P_M = N_{P,M} \cdot \rho \cdot N_M^3 \cdot d_{2,M}^5 = 13.5 \cdot 1250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.5^3 \frac{1}{\text{s}^3} \cdot 5.04^5 \text{ m}^5 = 127.5 \text{ kW}$$

Calcular el tiempo de mezcla en el caso del modelo según el diagrama  $N_M, t_m$  vs.  $Re$  ( $Re = 259$ ) obtenemos  $N_M t_m = 67.7$

$$t_{m,M} = \frac{67.7}{1.5} \text{ s} = 45 \text{ s}$$

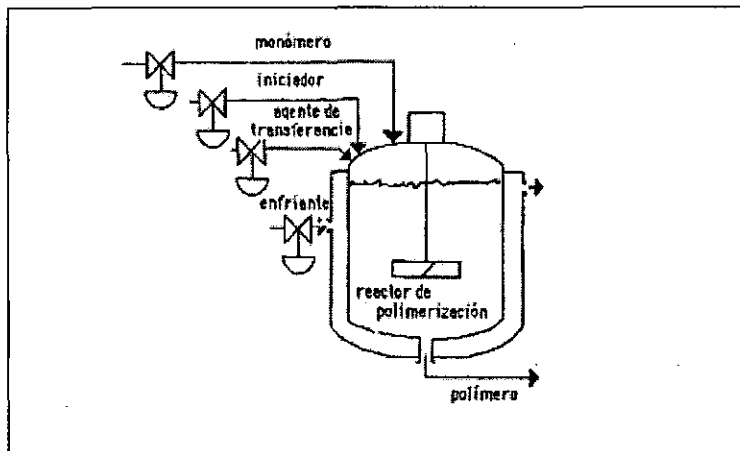
Calcular la potencia en el caso del proceso según DIN 28131 el Reynolds máximo para agitadores helicoidal es 34. Con la definición del Reynolds sacamos el valor nuevo de  $N_p$ :

$$Re_{P,máx} = \frac{N_P \cdot d_{2,P}^2}{\nu} \Rightarrow N_P = \frac{Re_{P,máx} \cdot \nu}{d_{2,P}^2} = \frac{34 \cdot 2.92 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{4.92^2 \text{ m}^2} = 0.04 \frac{1}{\text{s}} = 2.5 \text{ min}$$

Por lo tanto se calcula la potencia en el caso del reactor de polimerización:

$$P_P = N_{P,P} \cdot \rho \cdot N_P^3 \cdot d_{2,M}^5 = 259 \cdot 1250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.04^3 \frac{1}{\text{s}^3} \cdot 4.92^5 \text{ m}^5 = 59.7 \text{ kW} = 106 \text{ hp}$$

✓ **BALANCE DE ENERGÍA REACTOR DE POLIMERIZACIÓN – DISEÑO DE CHAQUETA**



➤ **Medio Enfriamiento:**

Se utilizará salmuera al 25% de cloruro de calcio (salmuera) como medio refrigerante. La cantidad de refrigerante necesaria se calcula en base a la siguiente reacción:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)$$

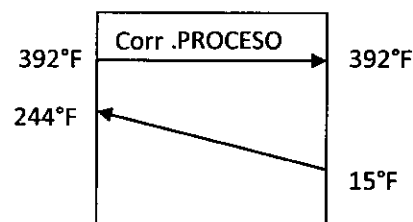
➤ **Área para la transferencia de calor:**

Para calcular la cantidad de calor transferido a través de la chaqueta se calcula de acuerdo con la ecuación de Fourier:

$$Q = U \cdot A \cdot \text{MLDT}$$

Sabiendo que el coeficiente:  $U = 600 \text{ BTU/hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}$  (Tabla 8 de Donald Kern). Por utilizar salmuera como medio de enfriamiento en el reactor de polimerización.

➤ **Diagrama de transferencia de calor:**



Donde:

$T_1 = T_2 =$  temperatura en el reactor de polimerización = 302 °F

$t_1 =$  temperatura de entrada de la salmuera = 15°F

$t_2 =$  temperatura de salida de la salmuera = 244°F

$$MLDT = \frac{(302-244) - (302-15)}{\ln\left(\frac{302-244}{302-15}\right)}$$

$$MLDT = 143 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Para calcular el área de calor de la chaqueta consideramos el fondo como plano, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Ach = \frac{\pi D_j^2}{4} + \pi * D_j * H$$

Ach = área total de transferencia de calor para la chaqueta.

Dj: diámetro del reactor de polimerización.

H: altura del líquido.

$$Ach = \frac{\pi(5.04)^2}{4} + \pi * 5.04 * \frac{5}{6} * 7.56 = 119.6 \text{ m}^2 = 1288 \text{ pie}^2 \text{ (Área de la chaqueta)}$$

$$Q = 600 \frac{\text{BTU}}{\text{h} * \text{pie}^2 * ^{\circ}\text{F}} * 1288 \text{ pie}^2 * 143^{\circ}\text{F} = 1.104\text{E}+08 \text{ BTU/h (Calor del reactor polimerización).}$$

Pero hallando el flujo másico del medio refrigerante de salmuera es:

$$T_m = (244 + 15)/2 = 129.5^{\circ}\text{F} \text{ (Temperatura promedio de salmuera al 25\%)}$$

$$C_p = 0.825 \text{ BTU/lb}^{\circ}\text{F} \text{ (Gráfica 2 de Donald Kern de calores específicos)}$$

$$2562000 = m * 0.825 * (244 - 15)$$

$$m = 616647 \text{ lb/h} = 280294 \text{ kg/h de salmuera al 25 \% concentración.}$$

#### ➤ Calor de agitación:

Potencia de agitación del reactor polimerización: 106 hp

$$\text{Calor generado} = 106 \text{ hp} * \frac{550 \text{ lbf-pie/s}}{1 \text{ hp}} * \frac{1 \text{ BTU}}{778.17 \text{ pie-lbf}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 269710 \text{ Btu/hr}$$

La reacción de polimerización es:  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4 \longrightarrow \text{PLA}$

#### ➤ Calor de reacción de polimerización:

$$Q_r + Q_{\text{agitación}} = Q_{\text{total}}$$

$$(+)\ Q_r + 269710 \text{ BTU/h} = 1.104\text{E}+08 \text{ BTU/h}$$

$$Q_r = (+) 1.101\text{E}+08 \text{ BTU/h (La reacción de polimerización es endotérmica).}$$

Pero  $Q = \Delta H$

$$T_{\text{referencia}} = 25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ }^{\circ}\text{K}, \quad P = 1 \text{ atm}$$

$$T_{\text{operación}} = 200^{\circ}\text{C} = 473 \text{ }^{\circ}\text{K}, \quad P = 2 \text{ atm}$$

Los valores de entalpía de formación y de Cp se obtendrán del libro Chemical Properties, HandBook donde se encuentran propiedades físicas de los compuestos.

$$\Delta \hat{H}_r = 1 * \Delta \hat{H}_f (\text{PLA}) - 1 * \Delta \hat{H}_f \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4$$

$$Q = (+) \Delta H = + 1.104\text{E}+08 \text{ BTU/h} = + 1.165\text{E}+08 \text{ kJ/h}$$

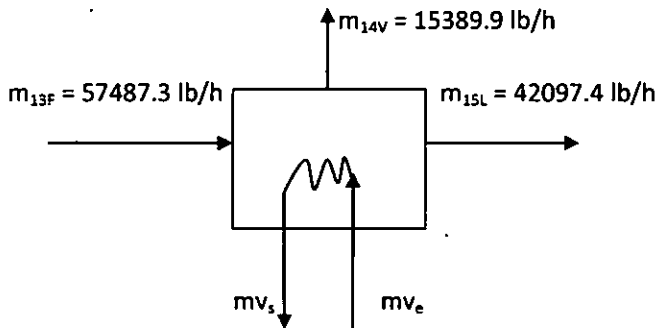


## 7.1.5 CÁLCULOS DE DISEÑO PARA EVAPORADORES

### 7.1.5.1 DISEÑO DE EVAPORADOR DE LACTATO DE CALCIO (F-01)

La función del primer evaporador es concentrar el lactato de calcio desde un hasta 30%, se debe tener en cuenta que la concentración final no sobrepase y así evitar la cristalización del lactato de calcio.

#### A. BALANCE DE MATERIA



#### B. PROPIEDADES Y CONDICIONES DE LAS CORRIENTES

PROPIEDADES				
CORRIENTE	FLUJO (lb/h)	T (°F)	Cp (BTU/lb*°F)	λ (BTU/lb)
m <sub>13F</sub>	57487.3	176	3.52	...
m <sub>14V</sub>	15389.9	212	...	970.4
m <sub>15L</sub>	42097.4	212	...	...
mv	?	328	...	889.2

#### C. BALANCE DE ENERGÍA

$Q - \dot{W} = m(\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p)$ ; Las energía cinéticas y potenciales son despreciables

$H = U + PV$ , entonces  $\Delta H = \Delta U$ ; La entalpía específica y energía interna del sistema son iguales

$Q = m \cdot \Delta H$ ; es decir

$$m_{13F} \cdot H_{13F} + m_{ve} \cdot H_{ve} + Q = m_{14V} \cdot H_{14V} + m_{15L} \cdot H_{15L} + m_{vs} \cdot H_{vs}$$

$$H_{13F} = \int_{T_v}^{T_{13F}} c_p dT \quad H_{15L} = \int_{T_v}^{T_{14V}} c_p dT$$

Reordenando el balance de energía del evaporador F-01 resulta:

$$Q_{vapor} = Q_{requerido} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q_{requerido} = m_{13F} \cdot C_p \cdot (T_v - T_F) + m_{14V} \cdot \lambda_v$$

$$Q_{requerido} = 57487.3 \frac{lb}{h} \cdot 3.52 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \cdot (212 - 176)^\circ F + 15389.9 \frac{lb}{h} \cdot 970.4 \frac{BTU}{lb}$$

$$Q_{requerido} = 8.782E + 07 BTU/h = 9.265E + 07 kJ/h$$

#### D. CALCULO DE VAPOR REQUERIDO

$$Q_{\text{vapor requerido}} = m_v * \lambda_{m_v}$$

$$Q_{\text{vapor requerido}} = m_v * 889.2$$

$$m_v = \frac{8.782E+07 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{889.2 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}} = 98763 \text{ lb/h} = 44892 \text{ kg/h (vapor saturado)}$$

#### E. CALCULO DE ÁREA DE CALENTAMIENTO

El coeficiente de diseño U se estima en 1500 BTU/h\*°F\*ft² para evaporadores de simple efecto.

$$A_{\text{evaporador1}} = \frac{8.782E+07 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{900 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{F} \cdot \text{ft}^2} * (328 - 212) \text{ F}} = 503 \text{ ft}^2 \approx 47 \text{ m}^2$$

#### F. TIPO Y DISPOSICIÓN DE LOS TUBOS:

Se dispone de tubos DE ¾" BWG 16 de longitud 15 ft:

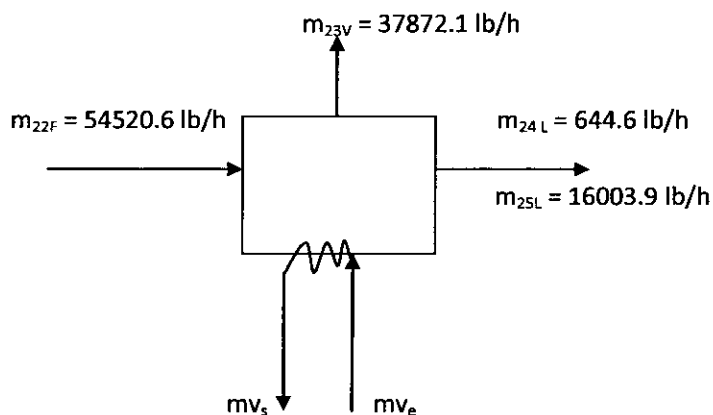
$$N^{\circ} \text{tubos} = \frac{503 \text{ ft}^2}{15 \frac{\text{ft} \cdot \text{lin} \cdot \text{sal}}{\text{tubo}} * 0.671 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft} \cdot \text{lin} \cdot \text{sal}}} = 50 \text{ tubos}$$

Según tabla 9 del apéndice de Donald Kern. La cantidad más cercana para acomodar 80 tubos de ¾" es de arreglo cuadrado de 1plg.

#### 7.1.5.2 DISEÑO DE EVAPORADOR DE ÁCIDO LÁCTICO (F-02)

La función del segundo evaporador es la de concentrar el ácido láctico desde un 30% hasta 90%, concentración que se admite para llevar a cabo los procesos de reacción.

#### A. BALANCE DE MATERIA



## B. PROPIEDADES Y CONDICIONES DE LAS CORRIENTES

PROPIEDADES				
CORRIENTE	FLUJO (lb/h)	T (°F)	H (BTU/h)	λ (BTU/lb)
m <sub>22F</sub>	54520.6	113	-3.459E+08	...
m <sub>23V</sub>	37872.1	212	-2.154E+08	970.4
m <sub>24L</sub>	644.6	176	2.180E+08	...
m <sub>25L</sub>	16648.5	176	7.571E+07	...
mv	?	328	...	889.2

## C. BALANCE DE ENERGÍA

$Q - \dot{W} = m(\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p)$ ; Las energía cinéticas y potenciales son despreciables

$H = U + PV$ , entonces  $\Delta H = \Delta U$ ; La entalpía específica y energía interna del sistema son iguales

$Q = m \cdot \Delta H$ ; es decir

$$m_{22F} \cdot H_{22F} + m_{ve} \cdot H_{ve} + Q = m_{23V} H_{23V} + m_{24L} H_{24L} + m_{25L} H_{25L} + m_{v_s} \cdot H_{v_s}$$

Reordenando el balance de energía del evaporador F-02 resulta:

$$Q_{vapor} = Q_{requerido} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q_{requerido} = 37872.1 \cdot (-2.154E+08) + 644.6 \cdot (2.180E+08) + 16003.9 \cdot (7.571E+07) - (54520.6 \cdot (-3.459E+08))$$

$$Q_{requerido} = 1.252E+08 \text{ BTU/h} = 1.321E+08 \text{ kJ/h}$$

## D. CÁLCULO DE VAPOR REQUERIDO

$$Q_{vapor} = mv \cdot \lambda_{mv}$$

$$Q_{vapor} = mv \cdot 889.2$$

$$mv = \frac{1.252E+08 \text{ BTU/h}}{889.2 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}} = 140801 \text{ lb/h} = 64000 \text{ kg/h} \quad (\text{vapor saturado})$$

## E. CALCULO DE ÁREA DE CALENTAMIENTO

El coeficiente de diseño U se estima en 1500 BTU/h\*°F\*ft² para evaporadores de simple efecto.

$$A = \frac{4844211.3 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{600 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{F} \cdot \text{ft}^2} \cdot (328 - 212) \cdot \text{F}} = 720 \text{ ft}^2 \approx 67 \text{ m}^2$$

## F. TIPO Y DISPOSICIÓN DE LOS TUBOS

Se dispone de tubos DE ¾" BWG 16 de longitud 15 ft:

$$N^{\circ} \text{tubos} = \frac{70 \text{ ft}^2}{10 \frac{\text{ft} \cdot \text{lineal}}{\text{tubo}} \cdot 0.1963 \frac{\text{ft}^2}{\text{ft} \cdot \text{lineal}}} = 72 \text{ tubos}$$

Según tabla 9 del apéndice de Donald Kern. La cantidad más cercana para acomodar 72 tubos de ¾" es con arreglo triangular de 1plg.

### 7.1.6 CÁLCULO DE DISEÑO DEL CALDERO:

El caldero utilizado en la planta de proceso es acuotubular de tubos curvados. El combustible a usar es fuel oil Diesel 6 a 18°API (Bunker).

#### A. CAPACIDAD DEL CALDERO

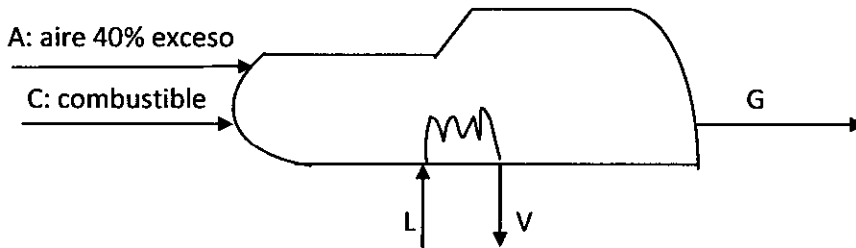
Se utiliza el agua condensada proveniente de los evaporadores, la cantidad de vapor utilizada en los intercambiadores de calor y el agua fría para reponer las pérdidas de calor del sistema de proceso.

	FLUJO (lb/h)	T (°F)
EVAPORADOR I (F-01)	98762.0	328
EVAPORADOR II (F-02)	140800.0	328
INTERCAMBIADOR I (EX-01)	2646600.0	212-302
INTERCAMBIADOR II (EX-02)	2666400.0	212-284
AGUA FRÍA	1110512.4	77
TOTAL	6663074.4	

Se asume 20% de pérdidas de calor en la caldera:

Vapor requerido =  $5552562.0 \times 1.20 = 6663074.4 \text{ lb/h} = 3028670 \text{ kg/h}$

#### B. DATOS DE DISEÑO DEL CALDERO



L: Líquido saturado.

A: Aire consumido para quemar el combustible.

V: Vapor saturado.

G: Gases de combustión (Análisis de Orsat)

Presión de vapor a la salida: 100 psi.

Temperatura de vapor de salida = 328°F

#### C. BALANCE DE ENERGÍA: (Tabla 7 de Donald Kern - Vapor saturado)

H vapor saturado a 328°F y 100 psi = 1308.8 BTU/lb

H de agua saturada a 328°F = 298.6 BTU/lb

H de agua fría a 77°F y 14.7 psi = 45.06 BTU/lb

Estas son las propiedades termodinámicas en la operación del caldero.

Entalpía de la mezcla:  $h_m = \frac{29313000 \times 298.6 - 1110512.4 \times 45.06}{6663074.4} = 1306.1 \text{ BTU/lb}$

Balance entálpico:

$Q_{T \text{ caldero}} = mv \cdot (H_v - h_m)$

$Q_{T \text{ caldero}} = 6663074.4 \cdot (1308.8 - 1306.1) = 17990301 \text{ BTU/h} = 18979767 \text{ kJ/h}$

$Q_{T \text{ caldero}} = \frac{17990301}{0.80} = 22487876 \text{ BTU/h} = 23724709 \text{ BTU/h} = 25039568 \text{ kJ/h}$  (Eficiencia del caldero 80 %)

#### D. CONSUMO DEL COMBUSTIBLE

La potencia calorífica del Fuel Oil (Bunker) 18°API a 77°F = 19000 BTU/lb

$$\text{Consumo del combustible} = \frac{23724709}{19000} = 1249 \text{ lb/h} = 2747.8 \text{ kg/h}$$

#### E. CONSUMO DE AIRE

La cantidad química necesaria para quemar el combustible es de 13.7 lb aire/lb comb. Un análisis de Orsat (no se considera la humedad) de los gases que salen como producto de la combustión del Fuel Oil utilizada en el caldero y tomando como base de cálculo 100 lbmol de gases secos se obtiene:

COMPUESTO	lbmol	PM (lb/lbmol)
CO <sub>2</sub>	11.2	44
CO	0.4	28
O <sub>2</sub>	6.2	32
N <sub>2</sub>	82.2	28
TOTAL	100	PM <sub>prom</sub> = 30.04

Para obtener 11.2 lbmol de CO<sub>2</sub> en el análisis de Orsat es necesario usar un exceso de aire de 40% para quemar el bunker.

$$\text{Aire usado} = \frac{13.7 \cdot 1249}{0.4} = 48107.5 \text{ lb/h} = 23.7 \text{ mol/min} = 9290 \text{ CFM}$$

#### F. POTENCIA DEL SOPLADOR DEL AIRE:

La caída de presión en el soplador: asumiendo una caída de presión  $\Delta P = 1 \text{ lb/pulg}^2$

$$\text{Potencia} = \frac{nRT}{33000} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{23.7 \cdot 1545 \cdot 537}{33000} \cdot \ln\left(\frac{15.7}{14.7}\right) = 39.2 \text{ hp}$$

Se usará un impulsor con corriente alterna cuya eficiencia se estima en un 80%.

$$\text{Potencia del impulsor} = \frac{39.2}{0.8} = 49 \text{ hp. Se especifica un motor de potencia de 50 hp.}$$

- **Ventajas:** Pueden ser puestas en marcha rápidamente y trabajan a 300 PSI o más.
- **Desventajas:** Mayor tamaño y peso, mayor costo, alimentada con agua de gran pureza.

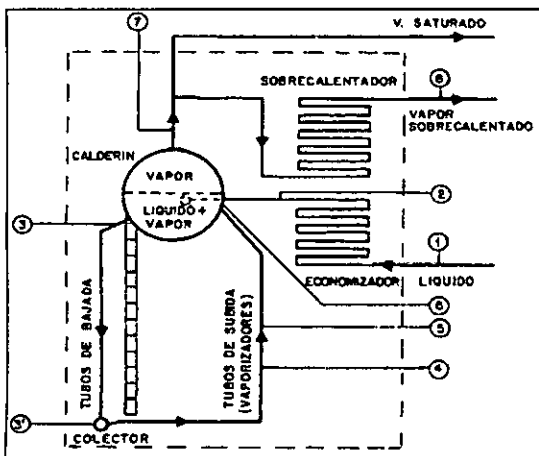


Figura 2. Esquema de una caldera acuotubular de vapor saturado y líquido saturado mostrando sus diferentes secciones. El agua líquida entra al economizador (1), donde se calienta hasta una temperatura próxima a la de saturación (2), se introduce en el calderín y desciende por los tubos de riego (3-3') hasta el colector inferior, distribuyéndose hacia los tubos vaporizadores, donde se forman las burbujas de vapor (4-5) que a su vez se separan en el calderín (6). El vapor saturado (7) puede calentarse por encima de su temperatura de saturación en el sobrecalentador (8). La circulación del agua por los tubos de bajada (riegos) y de subida (vaporizadores) puede ser por convección natural, debido a la diferencia de densidades (izquierda), o forzada mediante una bomba.

## 7.2 DISEÑO DE EQUIPOS AUXILIARES

### 7.2.1 DISEÑO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

#### 7.2.1.1 DISEÑO DE TANQUE ALMACENAMIENTO MATERIA PRIMA LACTOSUERO

##### ✓ CALCULO DE DIMENSIONES

$$\tau = \frac{V}{v} \text{ (Para fluidos, tipo tanque)}$$

$$v = 24570 \text{ kg/h} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1038.1 \text{ kg}} = 24 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{SOL}} = 48 \text{ h} \cdot 24 \text{ m}^3/\text{h} = 1152 \text{ m}^3 / \text{N}^{\circ} 2 \text{ tanques}$$

$$V_{\text{SOL c/u tanque}} = 576 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{DISEÑO TANQUE}} = 576 \text{ m}^3 \cdot 1.20 = 691 \text{ m}^3$$

$$D = 7.6 \text{ m} = 24.9 \text{ pie}$$

$$H = 15.2 \text{ m} = 49.8 \text{ pie}$$

$$H_{\text{liq}} = \frac{5}{6} \cdot 15.2 = 12.7 \text{ m} = 41.7 \text{ pie}$$

##### ✓ ESPESOR DE DISEÑO

PRESION DEL DISEÑO:  $P_{\text{diseño}} = (P_{\text{hidrostática}} + P_{\text{atm}}) \cdot 1.20$ , añadiendo 20% de seguridad, la cual ejerce presión la altura del líquido en el tanque de almacenamiento.

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho \cdot g \cdot H_{\text{liq}} = 1038.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 15.2 \text{ m} = 154793 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 22.7 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\text{Dato: } P_{\text{atm}} = 552 \text{ mm Hg} = 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \text{ (Presión atmosférica en Cajamarca)}$$

$$P_{\text{dis}} = (22.7 + 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}) \cdot 1.2 = 28.1 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

##### ✓ ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):

El espesor de diseño para el casco se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{28.1 \cdot 299}{2 \cdot 15700 \cdot 0.85 - 1.2 \cdot 28.1} + 0.125 = 0.44 \text{ plg} = 11.1 \text{ mm (Rase Barow, p 239)}$$

Se especifica material de acero inoxidable austenítico ASTM A 240–304L de 1/2" espesor para la cubierta.

##### ✓ ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)

El espesor de los cabezales o fondo de los tanques se calcula según la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{28.1 \cdot 299}{4 \cdot 15700 \cdot 0.85 - 0.4 \cdot 28.1} + 0.125 = 0.28 \text{ plg} = 7.1 \text{ mm (Rase Barow, p 239)}$$

Se especifica cabezal hemisférico superior de 3/8" y cabezal hemisférico inferior de 3/8" acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L.

### 7.2.1.2 DISEÑO DE TANQUE ALMACENAMIENTO SOLUCION DE LECHADA DE CAL

#### ✓ CALCULO DE DIMENSIONES

$$\tau = \frac{V}{v} = 496.5 \text{ kg/h} * \frac{1 \text{ m}^3}{2211 \text{ kg}} = 0.22 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{SOL}} = 120 \text{ h} * 0.22 \text{ m}^3/\text{h} = 26 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{DISEÑO TANQUE}} = 70 \text{ m}^3 * 1.20 = 84 \text{ m}^3$$

$$D = 2.7 \text{ m} = 8.8 \text{ pie}$$

$$H = 5.4 \text{ m} = 17.6 \text{ pie}$$

$$H_{\text{liq}} = \frac{5}{6} * 5.4 = 4.5 \text{ m} = 14.8 \text{ pie}$$

#### ✓ ESPESOR DE DISEÑO

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho * g * H_{\text{liq}} = 2211 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 4.5 \text{ m} = 97605 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 14.3 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\text{Dato: } P_{\text{atm}} = 552 \text{ mm Hg} = 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \text{ (Presión atmosférica en Cajamarca)}$$

$$P_{\text{dis}} = (14.3 + 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}) * 1.2 = 18.0 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

#### ✓ ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):

Sustituyendo la ecuación:

$$t_d = \frac{18.0 * 105}{2 * 15700 * 0.85 - 1.2 * 18.0} + 0.125 = 0.19 \text{ plg} = 4.98 \text{ mm.}$$

Se especifica material de acero inoxidable austenítico ASTM A 240–304L de ¼" espesor para la cubierta.

#### ✓ ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)

El espesor de los cabezales o fondo de los tanques se calcula según la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{P_{\text{dis}} * D}{4 S * E - 0.4 * P} + c \quad (\text{Rase Barow, p 239})$$

Sustituyendo la ecuación:

$$t_c = \frac{18.0 * 105}{4 * 15700 * 0.85 - 0.4 * 18.0} + 0.125 = 0.16 \text{ plg} = 4.01 \text{ mm}$$

Se especifica cabezal hemisférico superior de ¼" y cabezal hemisférico inferior de ¼" acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L.

### 7.2.1.3 DISEÑO DE TANQUE PULMON DE ÁCIDO SULFÚRICO

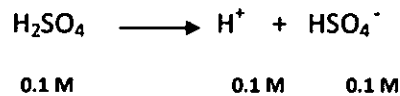
pH = 6,  $pH = -\log [H^+]$  entonces  $[H^+] = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}$

pH = 4,  $[H^+] = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$

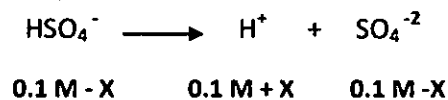
Cantidad de iones  $H^+$  que debe aportar el ácido sulfúrico añadido:

$$[H^+] = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-6} = 9.9 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$$

Al tratarse de un ácido diprótico hay que considerar las dos constantes de acidez, el primer equilibrio esta desplazado por completo a la derecha, por lo que el ácido se disocia por completo.



En el segundo si hay que tener en cuenta la constante de acidez:



$$K_a = 1,3 \cdot 10^{-1} = \frac{(0.1+x)x}{(0.1-x)} \longrightarrow x = 0.047 \text{ M}$$

Al final la cantidad total de  $H^+$  que genera el ácido sulfúrico 0.1 M será:

$$[H^+] = 0.1 + 0.047 = 0.147 \text{ M}$$

Teniendo en cuenta esto, puede calcularse fácilmente la cantidad ácido sulfúrico necesario en el en el reactor de acidulación. Se precisa añadir  $9.9 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L } [H^+]$  para pasar de pH=6 a pH=4. 1 L de ácido sulfúrico 0.1 M proporciona 0.147 mol/L  $[H^+]$ .

Tabla 1. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL ACIDO SULFÚRICO	
Apariencia	Líquido incoloro
pH (solución 10% en agua)	<1
Punto de congelamiento	3 °C (98%)
Punto de ebullición	330 °C (98.3%)
Presión de Vapor	< 0.1 Pa a 20 °C
Densidad a 25 °C (agua=1)	1.83 (98.5%)
Solubilidad en agua	Soluble en todas las proporciones
$\Delta_r H^0_{\text{liquido}}$	-814 kJ/mol

Fuentes: [http://es.wikipedia.org/wiki/ácido\\_sulfúrico](http://es.wikipedia.org/wiki/ácido_sulfúrico)

#### ✓ CÁLCULO DE DIMENSIONES

$$\tau = \frac{V}{v} = 1588.5 \text{ kg/h} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1850 \text{ kg}} = 0.86 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{SOL}} = 120 \text{ h} \cdot 0.86 \text{ m}^3/\text{h} = 103 \text{ m}^3/\text{N}^\circ 2 \text{ tanques} = 51.5 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{DISEÑO TANQUE}} = 51.5 \text{ m}^3 \cdot 1.20 = 62 \text{ m}^3 \text{ c/u tanque}$$

$$D = 3.4 \text{ m} = 11.1 \text{ pie}$$

$$H = 6.8 \text{ m} = 22.2 \text{ pie}$$

$$H_{\text{liq}} = \frac{5}{6} \cdot 6.8 = 5.7 \text{ m} = 18.7 \text{ pie}$$



### ✓ ESPESOR DE DISEÑO

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho * g * H_{\text{liq}} = 1850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 5.7 \text{ m} = 103446 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 15.2 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\text{Dato: } P_{\text{atm}} = 552 \text{ mm Hg} = 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \text{ (Presión atmosférica en Cajamarca)}$$

$$P_{\text{dis}} = (15.2 + 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}) * 1.2 = 19.1 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

### ✓ ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):

El espesor de diseño para el casco se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{P_{\text{dis}} * D}{2 S * E - 1.2 * P} + c \quad (\text{Rase Barow, p 239})$$

Sustituyendo la ecuación:

$$t_d = \frac{19.1 * 133}{2 * 15700 * 0.85 - 1.2 * 19.1} + 0.125 = 0.22 \text{ plg.} = 5.59 \text{ mm.}$$

Se especifica un material **acero inoxidable austenítico ASTM A 240-304 L** de espesor para la cubierta.

### ✓ ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)

El espesor de los cabezales o fondo de los tanques se calcula según la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{P_{\text{dis}} * D}{4 S * E - 0.4 * P} + c \quad (\text{Rase Barow, p 239})$$

Sustituyendo la ecuación:

$$t_c = \frac{19.1 * 133}{4 * 15700 * 0.85 - 0.4 * 19.1} + 0.125 = 0.17 \text{ plg.} = 4.38 \text{ mm}$$

Se especifica un cabezal hemisférico superior de  $\frac{1}{4}$ " y cabezal hemisférico inferior de  $\frac{1}{4}$ " de acero inoxidable austenítico ASTM A 240 – 304 L.

## 7.2.1.4 DISEÑO DE TANQUE ALMACENAMIENTO DEL AGUA PARA EL PROCESO

### ✓ CALCULO DE DIMENSIONES

$$\tau = \frac{V}{v} \quad (\text{Para fluidos, tipo tanque})$$

$$v = 3028670 \text{ kg} * 5\% * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} = 151 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{SOL}} = 48 \text{ h} * 151 \text{ m}^3/\text{h} = 7248 \text{ m}^3 / \text{N}^\circ 6 \text{ tanques}$$

$$V_{\text{SOL}} \text{ c/u tanque} = 1208 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{DISEÑO TANQUE}} = 2424 \text{ m}^3 * 1.20 = 1450 \text{ m}^3$$

$$D = 9.7 \text{ m} = 31.8 \text{ pie}$$

$$H = 19.4 \text{ m} = 63.6 \text{ pie}$$

$$H_{\text{liq}} = \frac{5}{6} * 19.4 = 16.2 \text{ m} = 53.1 \text{ pie}$$

### ✓ ESPESOR DE DISEÑO

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho * g * H_{\text{liq.}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 16.2 \text{ m} = 158922 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{hidrostática}} = 23.4 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

$$\text{Dato: } P_{\text{atm}} = 552 \text{ mm Hg} = 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} \text{ (Presión atmosférica en Cajamarca)}$$

$$P_{\text{dis.}} = (23.4 + 0.73 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}) * 1.2 = 29.0 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

### ✓ ESPESOR DE LA CUBIERTA( CILINDRICO):

El espesor de diseño para el casco se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{P_{\text{dis}} * D}{2 S * E - 1.2 * P} + c \quad (\text{Rase Barow, p 239})$$

Sustituyendo la ecuación:

$$t_d = \frac{29.0 * 382}{2 * 18750 * 0.85 - 1.2 * 29.0} + 0.125 = 0.47 \text{ plg.} = 8.13 \text{ mm.}$$

Se especifica un material de acero inoxidable tipo 316 de 1/2" de espesor para la cubierta.

### ✓ ESPESOR DE LOS CABEZALES: (FONDO)

El espesor de los cabezales o fondo de los tanques se calcula según la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{P_{\text{dis}} * D}{4 S * E - 0.4 * P} + c \quad (\text{Rase Barow, p 239})$$

Sustituyendo la ecuación:

$$t_c = \frac{29.0 * 382}{4 * 18750 * 0.85 - 0.4 * 29.0} + 0.125 = 0.30 \text{ plg.} = 5.64 \text{ mm}$$

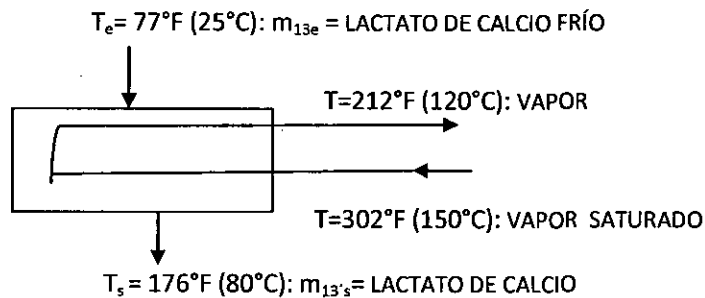
Se especifica un material de acero inoxidable tipo 316- 304 L de 3/8" de espesor para la cubierta.

De la misma tipología se calculará los diseños de los tanques para las siguientes funciones: almacenamiento de inóculo del *lactobacillus bulgaricus*, almacenamiento del iniciador alcohol isopropílico, almacenamiento del catalizador octoato de estaño y finalmente almacenamiento del producto ácido poliláctico (PLA) que se detallarán en las hojas de diseño respectivas.

## 7.2.2 DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

### 7.2.2.1 DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR CARCASA Y TUBO (EX-01)

#### A. DIAGRAMA INTERCAMBIADOR DE CALOR



#### B. PROPIEDADES DE LAS CORRIENTES DE FLUJO

CORAZA : SOLUCION DE LACTATO DE CALCIO	
FLUJO (lb/h)	57487.3
Cp (BTU/lb*°F)	1.72
K (BTU/°F* ft <sup>2</sup> *lb)	0.343
$\mu$ (BTU/lb*ft)	1.9
S*	0.98
TUBOS: VAPOR DE AGUA	
$\mu$ (BTU/lb*ft)	0.03
Cp (BTU/lb*°F)	0.57
$\Delta H_v$ (BTU/lb)	50
$\Delta T_v$ (°F)	90

#### C. BALANCE DE ENERGÍA

$Q - W = m(\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p)$ ; Las energía cinéticas y potenciales son despreciables

$H = U + PV$ , entonces  $\Delta H = \Delta U$ ; La entalpía específica y energía interna del sistema son iguales

$Q = m\Delta H$ ; es decir

$$m_{13}H_{13} + m_{\text{vapor saturado}}H_{\text{vapor saturado}} + Q = m_{13}H_{13'} + m_{\text{vapor}}H_{\text{vapor}}$$

$$H_{13} = \int_{T_{13s}}^{T_{13's}} cpdT, H_{\text{vapor saturado}} = \int_{T_{\text{vapor}}}^{T_{\text{vapor saturado}}} cpdT$$

$$Q = 57487.3 \frac{\text{lb}}{\text{h}} * 1.72 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} * (176 - 77)^\circ\text{F} + Q_{\text{pérdidas}} = 8.900\text{E}+06 + 18\% * Q_{\text{caliente}}$$

$$Q = 8.900\text{E}+06 + 4.922\text{E}+07$$

$$Q = 5.812\text{E}+07 \text{ BTU/h} = 6.132\text{E}+07 \text{ kJ/h}$$

#### D. FLUJO DE VAPOR DE CALENTAMIENTO

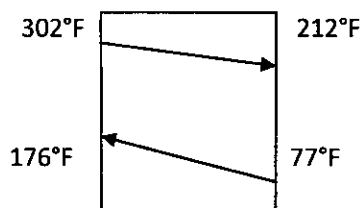
$$- 5.812\text{E}+07 = m_v * 0.57 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} * (212 - 302)^\circ\text{F}$$

$$m_v = 2.647\text{E}+06 \text{ lb/h} = 1.203\text{E}+06 \text{ kg/h (vapor saturado)}$$

### E. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISEÑO Y EL TIPO DE INTERCAMBIADOR A USAR

El coeficiente de diseño se estima en  $U_D = 1200 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ . Según el rango de la fuente Donald Kern para soluciones acuosas de viscosidad menores de 2cp. Este coeficiente se validara si el coeficiente de obstrucción es igual o mayor a 0.002 y las caídas de presión sean menores que 10 lb/plg<sup>2</sup> en la coraza y menor que 1.0 lb/plg<sup>2</sup> en los tubos. El tipo de intercambiador será de casco y tubos de 1" x 12 ft.

$$A = \frac{Q}{UD \cdot LMTD}$$



$$LMTD = \frac{(302-176)-(212-77)}{\ln \left( \frac{302-176}{212-77} \right)} = 130.4 \text{ } ^\circ\text{F} = 81.86^\circ\text{C}, \quad A_{\text{diseño}} = \frac{5.812E+07}{1200 \cdot 81.86} = 646 \text{ ft}^2 = 60 \text{ m}^2$$

### F. NÚMERO DE TUBOS

Para tubos de 1" y  $L = 12 \text{ ft}$

Superficie exterior:  $a'' = 0.2618 \text{ ft}^2/\text{ft}$  (tabla 10, DONALD KERN)

$$N^\circ \text{ tubos} = \frac{A}{a'' \cdot L} = \frac{646 \text{ ft}^2}{0.2618 \text{ ft}^2/\text{ft} \cdot 12 \text{ ft}} = 80 \text{ tubos}$$

De la tabla 9. Del apéndice del Donald Kern se escoge la disposición, cuenta y arreglo de los tubos según la cantidad de tubos calculados anteriormente.

DE = 1" (BWG 18)

$L = 12''$

DI = 12"

$B = 5''$

$N^\circ \text{ tubos} = 80$

Pasos = 1-2

Arreglo triangular de 1 1/4"

$D = 0.902'' = 0.0751 \text{ ft}$

### G. CÁLCULO DE VARIABLES DE DISEÑO EN LOS TUBOS

$$\text{Área de flujo: } a_t = \frac{N^\circ \text{ tubos} \cdot \text{área de flujo}}{n^\circ \text{ pasos}} = \frac{80 \cdot 0.639}{144 \cdot 2} = 0.177 \text{ ft}^2$$

$$\text{Velocidad másica: } G_t = \frac{m}{a_t} = \frac{2.645E+06 \text{ lb/h}}{0.177 \text{ ft}^2} = 1.494E+07 \text{ lb/h} \cdot \text{ft}^2$$

$$\text{Número de Reynolds: } Re = \frac{D \cdot G_t}{\mu} = \frac{0.0751 \cdot 1.494E+07}{0.03} = 37399800$$

Coeficiente de transferencia en los tubos:  $h_o = 1500 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ , este valor es usado para la condensación de vapor (Donald Kern pag.200-201)

## H. CÁLCULO DE VARIABLES DE DISEÑO EN LA CORAZA:

$$\text{Área de flujo: } a_s = \frac{DI \cdot C \cdot B}{144 \cdot P_t} = \frac{10 \cdot 0.25 \cdot 5}{144 \cdot 1.25} = 0.0694 \text{ ft}^2$$

$$\text{Velocidad másica: } G_s = \frac{\text{Flujo masico}}{a_s} = \frac{57487.3 \text{ lb/h}}{0.0694 \text{ ft}^2} = 828347.2 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2}$$

$$\text{Número de Reynolds: } \text{Res} = \frac{D_s \cdot G_s}{\mu} = \frac{0.06 \cdot 828347.2}{1.9} = 26158.3$$

De la figura 28 del apéndice del Donald Kern se obtiene  $J_H = 172$

$$\text{Coeficiente de transferencia en la coraza: } h_{io} = J_H \cdot \frac{k}{D} \cdot \left( \frac{C_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

$$h_{io} = 172 \cdot \frac{0.343}{0.06} \cdot \left( \frac{1.72 \cdot 1.9}{0.343} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{1.9}{0.95} \right)^{0.14} = 2297$$

## I. CÁLCULO DEL COEFICIENTE LIMPIO Y FACTOR DE OBSTRUCCIÓN

$$A = N^\circ \text{ tubos} \cdot a'' \cdot L = 80 \cdot 0.678 \cdot 12 = 650 \text{ ft}^2 = 60.5 \text{ m}^2$$

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot LMDT} = \frac{5.812E+07}{650 \cdot 130.4} = 685.7 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2}$$

$$\text{Cálculo del coeficiente total limpio } U_c = \frac{h_o \cdot h_{io}}{h_o + h_{io}} = 907.4 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2}$$

$$\text{Factor de obstrucción: } R_d = \frac{U_c - U_D}{U_c + U_D} = \frac{907.4 - 685.7}{907.4 + 685.7} = 0.0022$$

Sumario:

$U_c$	$U_D$	$R_d$	$U_c > U_D$
907.4	685.7	0.000356	Si cumple

## J. CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN:

### a) EN LA CORAZA:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5.22 \cdot 10^{10} \cdot D_s \cdot S \cdot \varphi_s} \quad \text{Donde:}$$

$$f = 0.0023 \quad (\text{de la figura 29, Donald Kern})$$

$$S^* = 0.98$$

$$D_s = 0.833$$

$$\Delta P_s = \frac{0.0023 \cdot 828347.2^2 \cdot 0.833 \cdot 38.4}{5.22 \cdot 10^{10} \cdot 0.06 \cdot 0.98 \cdot 1.102} = 17.9 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2}$$

$$De = 0.06$$

$$N+1 = 12 \left( \frac{L}{B} \right) = 12 \cdot \left( \frac{16}{5} \right) = 38.4$$

$$\varphi_s = \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1.102$$

### b) EN LOS TUBOS:

$$f = 0.00015 \quad (\text{figura 26, Donald Kern})$$

$$L = 12 \text{ ft}$$

$$n = 12 \quad (\text{pasos})$$

$$S = \frac{1}{\text{Volumen específico} \cdot 62.5} = \frac{1}{2.68E-06 \cdot 62.5} = 6 \cdot 10^3$$

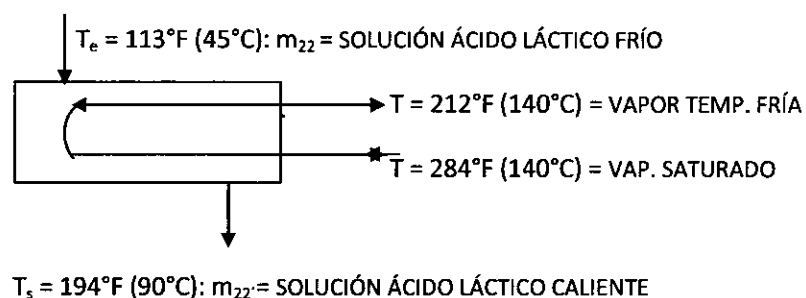
$$\Delta P_t = \frac{f \cdot G^2 \cdot L \cdot \pi}{2 \cdot 5.22 \cdot 10^{10} \cdot D_s \cdot S \cdot \phi_s} = \frac{0.00015 \cdot (1.494E+07)^2 \cdot 12 \cdot 2}{2 \cdot 5.22 \cdot 10^{10} \cdot 0.0752 \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 1.102} = 0.015 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2}$$

Sumario del intercambiador de calor:

Se calculó un factor de obstrucción de  $R_d = 0.0022$ , las caídas de presión en la coraza y en el tubo son 17.9 y 0.015 lb/plg<sup>2</sup> respectivamente por lo que el intercambiador de coraza y tubo si cumple satisfactoriamente los requerimientos de diseño.

### 7.2.2.2 DISEÑO DEL INTERCAMBIADORE DE DOBLE TUBO EX-02

#### A. DIAGRAMA DE INTERCAMBIADOR DE CALOR



#### B. PROPIEDADES DE LAS CORRIENTES DE FLUJO

ANULO : SOLUCIÓN DE LACTOSA	
FLUJO (lb/h)	15475
Cp (BTU/lb*°F)	0.997
K (BTU/°F* ft <sup>2</sup> *lb)	0.50
μ (BTU/lb*ft)	1.60
S*	1.3
TUBOS: VAPOR DE AGUA	
μ (BTU/lb*ft)	0.50
λ (BTU/lb)	970,4
T (°F)	212

#### C. BALANCE DE ENERGÍA

$Q - W = m(\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p)$  ; Las energía cinéticas y potenciales son despreciables

$H = U + PV$ , entonces  $\Delta H = \Delta U$ ; La entalpía específica y energía interna del sistema son iguales

$Q = m \cdot \Delta H$ ; es decir

$$m_{22} \cdot H_{22} + m_{\text{vapor saturado}} \cdot H_{\text{vapor saturado}} + Q = m_{13} \cdot H_{13} + m_{\text{vapor}} \cdot H_{\text{vapor}}$$

$$Q = 54520.6 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 0.997 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} \cdot (194 - 113)^\circ\text{F}$$

$$Q = 4.404E+06 \text{ BTU/h} = 4.647E+06 \text{ kJ/h}$$

#### D. FLUJO DE VAPOR DE CALENTAMIENTO

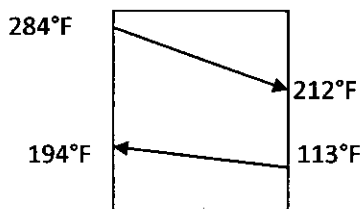
$$-4.404E+06 = m_v \cdot 0.002 \frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \cdot (212 - 284) ^\circ F$$

$$m_v = 2.666E+06 \text{ lb/h} = 1.212E+06 \text{ kg/h (vapor saturado)}$$

#### E. CALCULO DE VARIABLES DE DISEÑO DEL ÁNULO

El intercambiador de calor para la cantidad de vapor requerida escogemos tubos de 1½" y 2". Esto es correcto siempre y cuando las caídas de presión sean menores que 10 psi.

#### DIAGRAMA DE TEMPERATURAS



$$LMTD = \frac{(284 - 194) - (212 - 113)}{\ln \left( \frac{284 - 194}{212 - 113} \right)} = 94.4 ^\circ F = 52.5 ^\circ C$$

Según tabla 11 Donald Kern (DI = 2.067" = 0.17225ft, DE = 1.66" = 0.138ft)

$$\text{Área de flujo} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (0.17225^2 - 0.138^2) = 0.00826 \text{ ft}^2$$

$$\text{Diámetro equivalente} = \frac{(0.17225^2 - 0.138^2)}{0.138} = 0.0762 \text{ ft}$$

$$\text{Velocidad másica} = \frac{54520.6}{0.00826} = 6600557 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2}$$

$$\text{Numero de Reynolds} = \frac{0.0762 \cdot 6600557}{0.8} = 335308$$

$J_H = 695$  (fig. 24 del apéndice Donald Kern)

$$\left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} = \left( \frac{0.997 \cdot 1.5}{0.50} \right)^{1/3} = 1.44$$

$$\left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = \left( \frac{1.5}{3.38} \right)^{0.14} = 0.89$$

$$h_o = J_H \cdot \frac{k}{D} \cdot \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 695 \cdot \frac{0.50}{0.0762} \cdot 1.44 \cdot 0.89 = 5844 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ F$$

#### F. CALCULO DE VARIABLES DE DISEÑO DEL TUBO INTERIOR:

En el tubo interior se hará circular vapor saturado por lo que el coeficiente de transferencia de calor será:  $h_{io} = 2500 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ F$ , (según Donald Kern, por vapor del agua)

$$\text{Área de flujo} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0.115^2) = 0.0104 \text{ ft}^2$$

$$\text{Velocidad másica} = \frac{2.666E+06}{0.0104} = 2.56E+08 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ F}$$

$$\text{Numero de Reynolds} = \frac{0.115 \cdot 2.56E+08}{0.50} = 215993 \text{ (tabla 11 Di = 3.76 plg = 0.313 ft)}$$

### G. ÁREA DE DISEÑO, LONGITUD DE TUBOS Y NUMERO DE HORQUILLAS:

$$U_c = \frac{h_{io} \cdot h_o}{h_{io} + h_o} = \frac{2500 \cdot 5844}{2500 + 5844} = 1750 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_c} + R_d = \frac{1}{1750} + 0.003 = 0.00357$$

$$U_d = 280 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$\text{Área}_{\text{diseño}} = \frac{4.404E+06}{280 \cdot 94.4} = 166/2 = 83 \text{ ft}^2 \text{ (#2 intercambiadores de calor colocados en paralelo)}$$

De la tabla 11 Donald Kern para tubos estándar 1/2" IPS el  $a'' = 0.522 \text{ ft}^2$  superficie externa pie de longitud.

$$\text{Longitud total} = \frac{83}{0.522} = 159 \text{ ft lineal}$$

La longitud de un tubo es de 15 ft entonces una horquilla tendrá 30 ft de longitud:

$$N^\circ \text{ horquillas} = \frac{159}{30} = 5.3 \text{ ft} \approx 5.0 \text{ horquilla en c/u intercambiador de calor doble tubo.}$$

SUMARIO:

$U_c \text{ (BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F)}$	$U_D \text{ (BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F)}$	$R_d$	$U_c > U_D$
1750	280	0.003	SI CUMPLE

### H. CAÍDAS DE PRESIÓN:

#### 1. EN EL ÁNULO:

$$D_e = (D_2 - D_1) = 0.1725 - 0.138 = 0.0345 \text{ ft}$$

$$R_e = \frac{D \cdot G \cdot a}{\mu} = \frac{0.0345 \cdot 5600557}{1.5} = 151813$$

$$f = 0.0035 + \frac{0.264}{R_e^{0.42}} = 0.0035 + \frac{0.264}{151813^{0.42}} = 0.005$$

$$\text{Densidad} = 1.60 \cdot 62.5 = 97.64$$

$$\Delta f_a = \frac{4 \cdot f \cdot G \cdot a^2 \cdot L}{2 \cdot 4.18 \cdot 10^8 \cdot \rho^2 \cdot D_e} = \frac{4 \cdot 0.005 \cdot 5600557^2 \cdot 15.0}{2 \cdot 4.18 \cdot 10^8 \cdot 97.64^2 \cdot 0.0345} = 10.3 \text{ ft}$$

$$V = \frac{5600557}{3600 \cdot 97.64} = 8.89 \text{ ft/s}$$

$$\Delta f_b = 3 \cdot \frac{V^2}{2g} = 3 \cdot \frac{8.89^2}{2 \cdot 32.2} = 3.68 \text{ ft}$$

$$\Delta P = \frac{(10.3 + 3.68) \cdot 97.64}{144} = 9.5 \text{ lb/plg}^2$$

#### 1. EN EL TUBO INTERIOR:

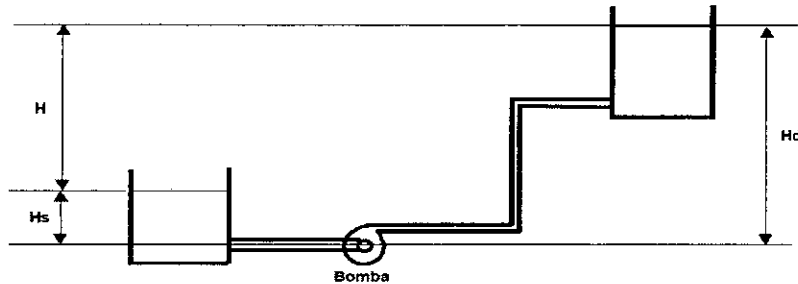
$$f = 0.0035 + \frac{0.264}{R_e^{0.42}} = 0.0035 + \frac{0.264}{(2.56E+08)^{0.42}} = 0.0036$$

$$\Delta F = \frac{4 \cdot 0.0023 \cdot (2.56E+08)^2 \cdot 7.75}{2 \cdot 4.18 \cdot 10^8 \cdot 62.5^2 \cdot 0.115} = 19.5 \text{ ft}, \Delta P = \frac{19.5 \cdot 62.5}{144} = 8.5 \text{ lb/plg}^2$$



### 7.2.3 CÁLCULO DE DISEÑO DE BOMBAS

#### 7.2.3.1 DISEÑO BOMBA DE AGUA PARA DESMINERALIZACIÓN



#### A. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL FLUÍDO A TRANSPORTAR

- Capacidad: 833.4 kg/h
- T° operación: 77°F
- Densidad ( $\rho$ ): 1007.3 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad ( $\mu$ ): 0.98 cp
- Presión de succión: 14.7 psia
- Presión de descarga: 14.7 psia
- Presión de vapor de succión: 0.44 psia
- Gravedad específica: 0.998

#### B. CÁLCULO DEL CAUDAL

$$Q = 833.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1007.3 \text{ kg}} * \frac{264.2 \text{ gal}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 3.7 \text{ GPM}$$

#### C. CÁLCULO DE CARGA HIDROSTÁTICA

##### EN LA SUCCIÓN:

BALANCE DE ENERGÍA ECUACION DE BERNOULLI:

$$\frac{V_1^2}{2 * g * c} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 * \frac{g}{g * c} + w = h_f + \frac{V_2^2}{2 * g * c} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 * \frac{g}{g * c}$$

Según el apéndice C-6 del Alan Foust: Di = 1.610 plg

$$H_s = h_s + h_{v_s} + h_{f_s} + 2.31 \frac{P}{\rho}$$

$$h_s = 1.7 \text{ ft}$$

$$\text{Velocidad: } v = 0.409 * \frac{Q}{A} = 1.3 \text{ ft/s}$$

**TUBERIA RECTA:**Resistencia debido a la entrada de borde afilado:  $K = 0.50$ 

$$h_{v_s} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{0.5 \cdot 6.8^2}{2 \cdot 32.2} = 0.36 \text{ ft}$$

SISTEMA	CANTIDAD	PIES EQUIVAL.	PIES TOTAL
TUBERIA RECTA	13		13
CODO 90°	2	4	8
VÁLVULA DE RETENCIÓN (CHECK)	1	9	9
TOTAL			30

Según el nomograma de caudales de Hazen-Williams (Cameron Hidráulic) para un caudal de 3.7 GPM, la pérdida es de 30 ft/ 1000ft.

$$h_{f_s} = 30 \cdot \frac{8.1}{1000} = 0.24 \text{ ft}$$

$$H_s = 1.7 + 0.36 + 0.9 + 2.31 \cdot \frac{14.7}{0.998} = 36 \text{ ft}$$

**EN LA DESCARGA:**

Diámetro: 1 ½ "

$$d = Z_d + h_{i_d} + h_{f_d} + 2.31 \frac{P}{\rho}, \quad h_d = 20 \text{ ft}$$

 $K = 1$  (según Alan Foust resistencia de salida al borde afilado)

$$h_{v_s} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{1 \cdot 6.8^2}{2 \cdot 32.2} = 0.03 \text{ ft}$$

SISTEMA	CANTIDAD	PIES EQUIVAL.	PIES TOTAL
TUBERIA RECTA	32	1	32
CODO 90°	6	4	24
T ESTANDAR	1	8	8
TOTAL			64

Según el nomograma de caudales de Hazen-Williams para un caudal de 3.7 GPM, la pérdida es de 30 ft/ 1000ft.

$$h_{f_d} = 64 \cdot \frac{8.1}{1000} = 0.52 \text{ ft}$$

$$H_D = 20 + 0.03 + 0.52 + 2.31 \cdot \frac{14.7}{0.998} = 55 \text{ ft}$$

Columna total de la bomba:  $H_{\text{total}} = H_D - H_s = 55 - 36 = 19 \text{ ft} = 5.79 \text{ m}$

#### D. CALCULO DEL CSPN (NPSH):

$$\text{CSPN} = H_s - P_v$$

Presión de vapor:  $P_v = 0.502 \text{ psia}$

$$\text{CSPN} = 36 - 2.31 * \frac{0.44}{0.998} = 36 \text{ ft} = 11.0 \text{ m (es satisfactorio porque es positivo)}$$

Debe cumplirse que el  $(\text{NPSH})_D > (\text{NPSH})_R$

**E. SELECCIÓN DE LA BOMBA:** Para 19 ft y 3.7 GPM, interceptando el caudal y la carga total del Alan Foust. Se elige una bomba centrífuga de 1750 rpm (Modelo 2045).

#### F. CABALLAJE DEL LÍQUIDO:

$$\text{LHP} = Q * H * \frac{\rho}{3960} = \frac{8.1 * 20 * 998}{3960} = 40 \text{ hp}$$

#### G. EFICIENCIA DE LA BOMBA:

$$N_s = \frac{N * Q^{0.75}}{H^{0.75}} = \frac{1750 * 8.1^{0.75}}{20^{0.75}} = 312. \text{ La eficiencia de la bomba según la gráfica se calcula en 20\% debido}$$

al bajo caudal la corrección por viscosidad es despreciable.

#### H. CABALLAJE DE FRENO:

$$\text{BHP} = \frac{\text{LHP}}{E_f} = \frac{0.54}{0.20} = 3.0 \text{ Hp}$$

#### I. UNIDAD MOTRIZ:

Motor eléctrico tipo Jaula de Ardilla de 220 V, eficiencia del 80%.

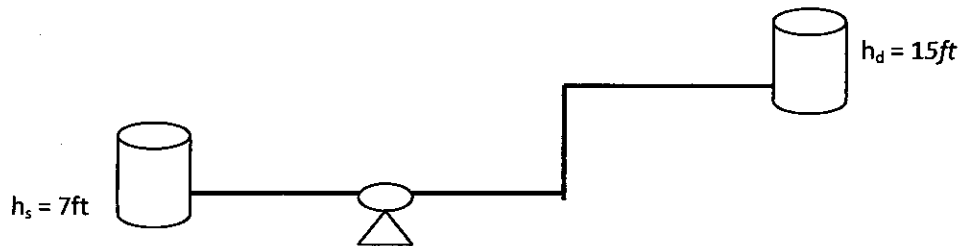
$$\text{rpm} = \frac{120 * f}{P} = \frac{120 * 60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

f: frecuencia de la luz 60 ciclos/s (60 hertz)

P: poros del enchufe 2

$$\text{kw} = \frac{\text{BHP} * 0.746}{\text{eff.}} = \frac{2.7}{0.8} * 0.746 * 100 = 250 \text{ kw}$$

### 7.2.3.2 DISEÑO BOMBA PARA ACIDO SULFÚRICO COMERCIAL PUREZA 98 %:



#### A. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL FLUIDO A TRANSPORTAR

Fluido a bombear:  $H_2SO_4$  (98% en solución)

Capacidad: 1588.5 kg/h

Temperatura de fluido a bombear:  $18^\circ C = 64^\circ F$

$P_s = 14.7$  psia (lb/pulg<sup>2</sup>)

$P_d = 14.7$  psia (lb/pulg<sup>2</sup>)

$P_v = 0.138$  kPa = 0.02 psia (lb/pulg<sup>2</sup>)

Densidad ácido sulfúrico ( $\rho$ ) =  $1850 \frac{kg}{m^3}$

Viscosidad ( $\mu$ ):  $0.012 \frac{kg}{m \cdot seg} = 1.2$  cp

Densidad relativa:  $\frac{\rho_{(acido)}}{\rho_{(H_2O)}} = \frac{1850}{1000} = 1.85$

#### B. CÁLCULO DEL CAUDAL A BOMBLEAR

$$Q = 1588.5 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{1850 kg} \cdot \frac{264.2 gal}{m^3} \cdot \frac{1 h}{60 min} = 4.0 \text{ GPM}$$

#### C. CÁLCULO DE CARGA HIDROSTÁTICA:

EN LA SUCCIÓN:

BALANCE DE ENERGÍA ECUACION DE BERNOULLI:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot gc} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \cdot \frac{g}{gc} + w = hf + \frac{V_2^2}{2 \cdot gc} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \cdot \frac{g}{gc}$$

Diámetro: DN 1 ½ "

Según el apéndice C-6 del Alan Foust:  $D_i = 1.610$  plg

Velocidad:  $v = \frac{Q}{A}$ , o también  $v = 0.409 \cdot \frac{Q}{D^2} = 0.63$  ft/s

Columna estática:  $h_s = 7$  ft

Columna de fricción:  $\sum hfs = hfi + hfs$

Entrada del sistema:  $hfi = k * \frac{v^2}{2gc}$ ,  $K = 0.5$  (entrada del borde afilado)

$$hfi = 0.5 * \frac{0.63^2}{2 * 32.2} = 0.004 \text{ ft}$$

TUBERIA RECTA Y ACCESORIOS:

La pérdida de presión por fricción en la tubería recta y accesorios es función del factor de fricción de Fanning, y este a su vez es función del Número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{D * v * \rho}{\mu} = 8283 \text{ (flujo turbulento } > 4000)$$

Donde:

$$D = 1.610 \text{ plg} = 0.134 \text{ ft}$$

$$\rho = 1850 \frac{kg}{m^3} = 115 \frac{lb}{ft^3}$$

$$v = 0.63 \text{ ft/s}$$

$$\mu = 0.012 \frac{kg}{m \cdot seg} = 0.008 \frac{lb}{ft \cdot s}$$

Para el fluido de ácido sulfúrico se requiere el diseño de las tuberías sea de material de PVC por ser corrosivo y abrasivo. Se halla el factor de fricción por el método gráfico de Moody, para ello se debe llevar el valor de la constante de rugosidad absoluta de la tubería de PVC que es  $\epsilon = 0.0015$ , para hallar el valor de rugosidad relativa y ponderarlo en el diagrama de Moody junto con el valor de Reynolds encontrando el valor de fricción de (f) es 0.036. (Factor de fricción de Fanning).

$$f = \frac{0.25}{\log \left( \frac{1}{2.7 \left( \frac{1}{3.7} + \frac{5.74}{N_{Re}^{0.9}} \right)} \right)^2}, \sum hfs = hfs_1 + hfs_2$$

Tubería recta:  $L = 17$  pies

$$hfs_1 = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = 0.036 * \frac{17}{0.134} * \frac{0.63^2}{2 * 32.2} = 0.03 \text{ ft (Ecuación de Darcy)}$$

Accesorios:

$$hfs_2 = k * \frac{v^2}{2g} \text{ (Tabla 3.4 de diseño de Bombas y accesorios)}$$

ACCESORIOS	CANTIDAD	k	TOTAL
CODO ESTANDAR	2	0.35	0.70
VALVULA DE COMPUERTA ABIERTA	1	0.17	0.17
<b>TOTAL</b>			<b>0.87</b>

Luego:

$$h_{fs2} = 0.87 * \frac{0.63^2}{2 * 32.2} = 0.005 \text{ ft}, h_{fs} = 0.03 \text{ ft} + 0.005 \text{ ft} = 0.035 \text{ ft}$$

**LADO DE LA DESCARGA:**

Columna estática:  $h_d = 15 \text{ ft}$

$$\sum h_{fd} = h_{fd1} + h_{fd2}$$

Salida del sistema:  $h_{fd} = k * \frac{V^2}{2gc}$ ,  $K = 1.0$  (salida del borde afilado)

$$h_{fi} = 1.0 * \frac{0.63^2}{2 * 32.2} = 0.006 \text{ ft}$$

**TUBERIA RECTA Y ACCESORIOS:**

El número de Reynolds es el mismo del lado de la succión por ser mismo caudal y el mismo diámetro de tubería; así mismo, el factor de fricción de Fanning, es igual al de la succión por el mismo material de la tubería el mismo. Tubería recta:  $L = 65$  pies.

$$h_{fd1} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = 0.036 * \frac{65}{0.134} * \frac{0.63^2}{2 * 32.2} = 0.10 \text{ ft}$$

a) Accesorios:

$$h_{fd2} = k * \frac{V^2}{2g} \text{ (Tabla 3.4 de diseño de Bombas y accesorios)}$$

ACCESORIOS	CANTIDAD	k	TOTAL
CODO ESTANDAR	2	0.35	0.70
T STANDAR	2	1.0	2.0
VALVULA DE COMPUERTA	1	0.17	0.17
TOTAL			2.87

$$h_{fd2} = 2.87 * \frac{0.63^2}{2 * 32.2} = 0.02 \text{ ft}$$

$$h_{fd} = 0.10 \text{ ft} + 0.02 \text{ ft} = 0.12 \text{ ft}$$

$$H_{\text{total}} = 15 - 7 + 0.004 + 0.03 + 0.035 + 0.12 = 8.19 \text{ ft}$$

Usando válvula de control:

$$\text{Resistencia: } 30\% * \sum hf = 0.30 * (0.006 + 0.10 + 0.02 + 0.12) = 0.07 \text{ ft}$$

$$H_{\text{total}} = 8.19 + 0.17 = 8.26 \text{ ft} = 2.52 \text{ m}$$

#### D. POTENCIA DESARROLLADA POR LA BOMBA O CABALLAJE DEL LÍQUIDO

$$kW = LHP = \frac{HQS}{3.67 \times 10^5} = \frac{4.8 \times 14.45 \times 1850}{3.67 \times 10^5} \times 100 = 35 \text{ kw} = 50 \text{ hp}$$

#### E. (CSPN)<sub>A</sub> COLUMNA DE SUCCIÓN NETA POSITIVA (NPSH)

$$(CSPN)_A = H_s - P_v$$

Presión de vapor:  $P_v = 0.02 \text{ psia}$

$$H_s = 7 + 0.004 + 0.035 + \frac{14.7 \times 2.31}{1.85} = 25.0 \text{ ft} = 7.62 \text{ m}$$

$$CSPN = 25 - 2.31 \times \frac{0.02}{1.85} = 24.9 \text{ ft} = 7.58 \text{ m (es satisfactorio porque es positivo)}$$

#### F. SELECCION DE LA BOMBA

Para 18.12 ft y 4.0 GPM, interceptando el caudal y la carga total del Alan Foust (Fig.5.7). En el área bajo la curva, se elige una bomba centrífuga de 1750 rpm (velocidad de rotación).

#### G. EFICIENCIA DE LA BOMBA

$$N_s = \frac{N \times Q^{0.25}}{H^{0.75}} = \frac{1750 \times 4.0^{0.25}}{8.26^{0.75}} = 508 \text{ (Velocidad específica). La eficiencia de la bomba según la gráfica se calcula}$$

en 20% debido al bajo caudal la corrección por viscosidad es despreciable.

#### CABALLAJE DE FRENO

$$BHP = \frac{LHP}{E_f} = \frac{0.50}{0.20} \times 100 = 250 \text{ Hp}$$

#### UNIDAD MOTRIZ

Motor eléctrico tipo Jaula de Ardilla de 220 V, eficiencia del 80%

$$\text{rpm} = \frac{120 \times f}{P} = \frac{120 \times 60}{2} = 3600 \text{ rpm}$$

f: frecuencia de la luz 60 ciclos/s (60 hertz)

P: poros del enchufe 2

$$kW = \frac{BHP \times 0.746}{eff.} = \frac{2.5}{0.8} \times 0.746 = 2.3 \text{ Kw}$$

De la misma tipología se calculará los diseños de las bombas para el desplazamiento de los siguientes fluidos en el proceso: **lactosuero, inóculo del lactobacillus bulgaricus, hidróxido de calcio y del iniciador alcohol isopropílico**, que se detallarán en las hojas de diseño respectivas.

## 7.2.4 DISEÑO DE SISTEMA DE TUBERÍAS

El diseño el sistema de tuberías para la planta de ácido poliláctico (PLA), consistirá en seleccionar el material de construcción de las tuberías, el diámetro y el espesor de las mismas así como la caída de presión que va experimentar el fluido. Para poder conducir los fluidos por la planta química va a ser necesario impulsarlo en determinados puntos mediante bombas, por lo que se calcula la potencia necesaria y la altura máxima que se colocarán indicando las válvulas necesarias a utilizar.

### ✓ DISEÑO DE TUBERÍAS:

Para realizar el diseño de rack de tuberías se ha dividido en 12 líneas de distribución principales las cuales son:

- Tanque de almacenamiento del lactosuero/Equipo de prefiltración. (LINEA 1)
- Tanque de almacenamiento de hidróxido de calcio/Reactor fermentador-neutralizador(LINEA 2)
- Tanque de almacenamiento de agua/Equipo Ultrafiltración-Diafiltración (LINEA 3)
- Tanque de almacenamiento del ácido poliláctico (PLA)/Reactor de Polimerización PLA. (LINEA 4)
- Reactor fermentador-neutralizador/Equipo Ultrafiltración-Diafiltración. (LINEA 5)
- Tanque de almacenamiento del ácido sulfúrico - Reactor de acidulación. (LINEA 6)
- Reactor de prepolimerización lactida - Reactor de polimerización del PLA. (LINEA 7)
- Intercambiador de calor EX-01/Evaporador de Lactato E-01. (LINEA 8)
- Intercambiador de calor EX- 02/Evaporador de Ácido Láctico E-02. (LINEA 9)
- Reactor de fermentador-neutralizador/Filtro rotatorio F-01. (LINEA 10)
- Reactor de prepolimerización lactida/Filtro rotatorio F-02. (LINEA 11)
- Equipo de prefiltración/Centrífuga. (LINEA 12)

### ✓ MATERIAL DE CONSTRUCCION DE LA S TUBERÍAS:

El material de construcción es importante debido a la presencia del insumo químico ácido sulfúrico al 98% de pureza. Así el material más adecuado se obtiene a partir de las tablas I de materiales NACE (National Association of Corrosión Engineers). Para ácido sulfúricos al 98% los materiales recomendados a las temperaturas establecidas son:

- Acero inoxidable Alloy 20 (20Cr – 30Ni).
- Monel 400 (66Ni -32Cu, estándar AS-TM B164.
- Hastelloy B.



✓ **CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE CADA LINEA DE TUBERÍA:**

Para determinar el diámetro de la tubería se tendrá en cuenta el caudal y se fijará para el fluido de que es la velocidad.

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Ecuación de la continuidad})$$

Q: caudal del fluido

V: velocidad de fluido.

A: área de paso del fluido.

✓ **CÁLCULO DE ESPESOR DE TUBERÍAS:**

El espesor mínimo de diseño se determina por la ecuación:

$$t_{\min} = \frac{PD \cdot D^2}{2(SE + Y \cdot PD)}$$

Donde:

$P_D$  : es la presión de diseño (lb/ pulg<sup>2</sup>).

$D^\circ$ : es el diámetro exterior de la tubería (ft).

S: es la tensión máxima admisible del material de diseño.

E: es el factor de calidad de soldadura, para tubería sin costura E=1.

Y: es un factor que depende de la temperatura y cuyo valor es de 0.4 hasta temperaturas de 700°F.

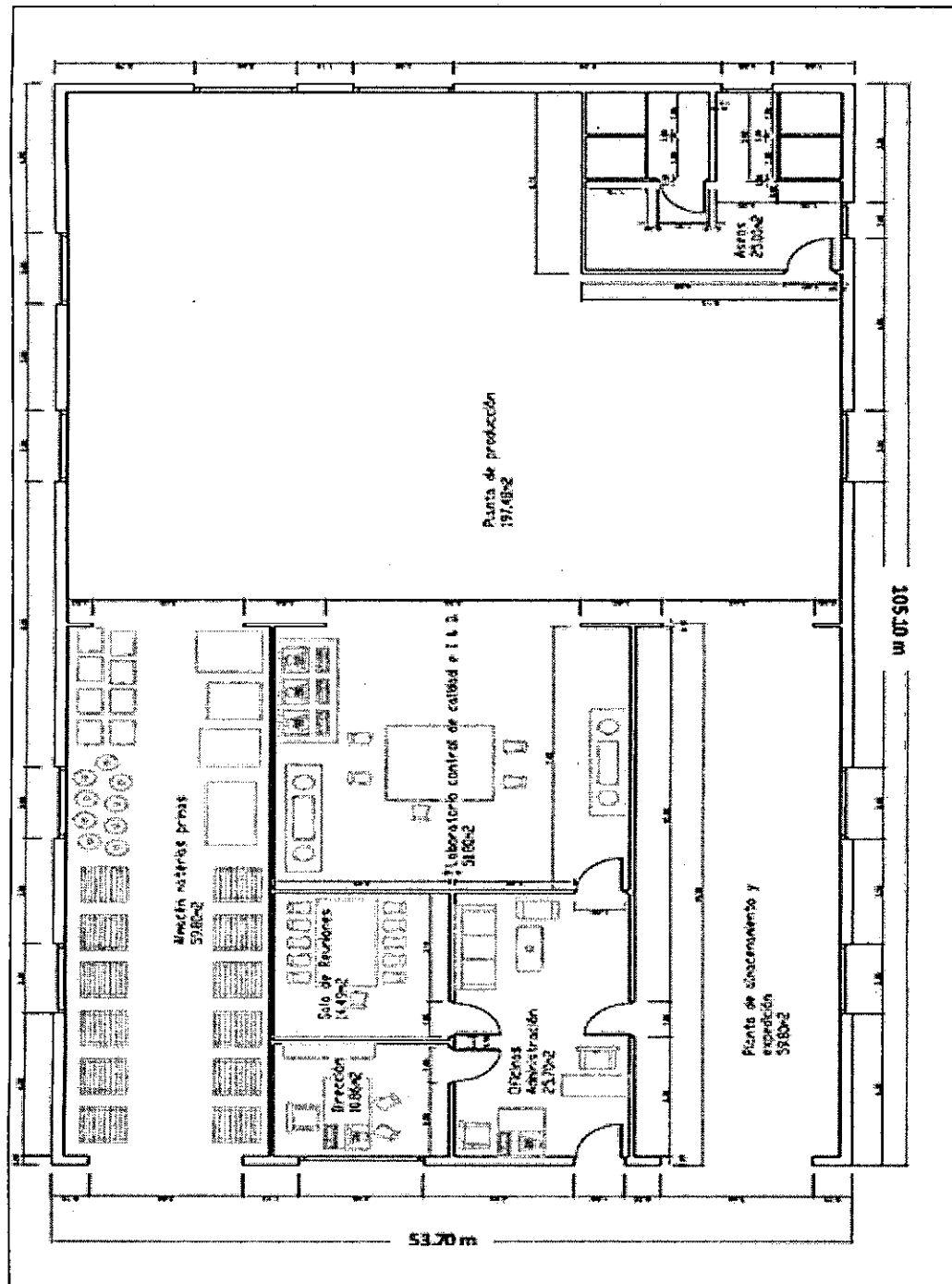
Se determinará los cálculos respectivos para las líneas de tuberías del proceso respectivamente:

**Tabla2. PARÁMETROS DE DISEÑO DE LÍNEAS DE TUBERÍAS DEL PROCESO DE PLA**

LINEA	AREA SUPERFICIAL(m <sup>2</sup> )	DIAMETRO NOMINAL	DIAMETRO EXTERIOR	ESPESOR	CAUDAL (m <sup>3</sup> /h)
LINEA 1	4.60*10 <sup>-3</sup>	3" CED.40	3.500"	0.216"	23.98
LINEA 2	2.66*10 <sup>-3</sup>	2½" CED. 80	2.875"	0.276"	9.6
LINEA 3	2.66*10 <sup>-3</sup>	2" CED. 80	2.375"	0.218"	9.6
LINEA 4	2.6*10 <sup>-4</sup>	¾" CED. 80	1.050"	0.154"	0.94
LINEA 5	6.02*10 <sup>-4</sup>	1 ½" CED. 40	1.900"	0.145"	2.17
LINEA 6	7.22*10 <sup>-4</sup>	1 " CED. 40	1.315"	0.133"	2.60
LINEA 7	3.14*10 <sup>-4</sup>	¾" CED. 40	1.050"	0.113"	1.13
LINEA 8	2.77*10 <sup>-3</sup>	2½" CED. 40	2.875"	0.203"	10.0
LINEA 9	2.72*10 <sup>-4</sup>	¾" CED. 40	1.050"	0.113"	0.98
LINEA 10	2.61*10 <sup>-3</sup>	2½" CED. 40	2.875"	0.203"	9.4
LINEA 11	2.11*10 <sup>-3</sup>	2" CED. 40	2.375"	0.218"	7.6
LINEA 12	1.25*10 <sup>-3</sup>	1¼" CED. 40	1.660"	0.140"	4.5

Fuente: Principios de Operaciones Unitarias Allan Foust, Apéndice C

DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA DE PLA



## EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para la estimación de inversión del capital para el proyecto, se basa en el costo de los equipos adquiridos para producción del ácido poliláctico (PLA) de acuerdo con los porcentajes se estiman los costos de los demás rubros según la Tabla 1 correspondiente:

TABLA 1. ESTIMACIÓN INVERSIÓN DEL CAPITAL DEL PROYECTO		
RUBRO	FACTOR	COSTO
<b>COSTOS DIRECTOS</b>		
EQUIPOS ADQUIRIDOS DEL PROCESO	100.00%	\$1'069452.65
INSTALACIÓN DE EQUIPOS ADQUIRIDOS	39.00%	\$417086.53
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESO (instalado)	28.00%	\$299446.74
TUBERÍAS Y ACCESORIOS (instalado)	31.00%	\$331530.32
INSTALACIONES ELÉCTRICAS (colocadas)	10.00%	\$106945.27
OBRAS CIVILES	22.00%	\$235279.58
MEJORAS DE TERRENO	10.00%	\$106945.27
INSTALACIÓN DE SERVICIOS	55.00%	\$588198.96
TERRENO	6.00%	\$64167.16
<b>COSTO DIRECTO TOTAL (D)</b>	<b>301.00%</b>	<b>\$3'219052.48</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>		
INGENIERÍA Y SUPERVISIÓN	32.00%	\$342224.85
GASTOS DE CONSTRUCCIÓN	34.00%	\$363613.90
<b>COSTO INDIRECTO TOTAL (I)</b>	<b>66.00%</b>	<b>\$705838.75</b>
<b>COSTO TOTAL DIRECTO E INDIRECTO (D+I)</b>		<b>\$3'924891.23</b>
HONORARIOS DE CONTRATISTA	5.00%(D+I)	\$196244.56
EVENTUALES	10.00%(D+I)	\$392489.12
<b>INVERSIÓN CAPITAL FIJO (FCI)</b>		<b>\$4'513624.91</b>
<b>CAPITAL DE OPERACIÓN (TRABAJO)</b>	<b>86.00%</b>	<b>\$919729.28</b>
<b>INVERSIÓN DEL CAPITAL</b>		<b>\$5'433354.19</b>

Fuente: Elaboración propia

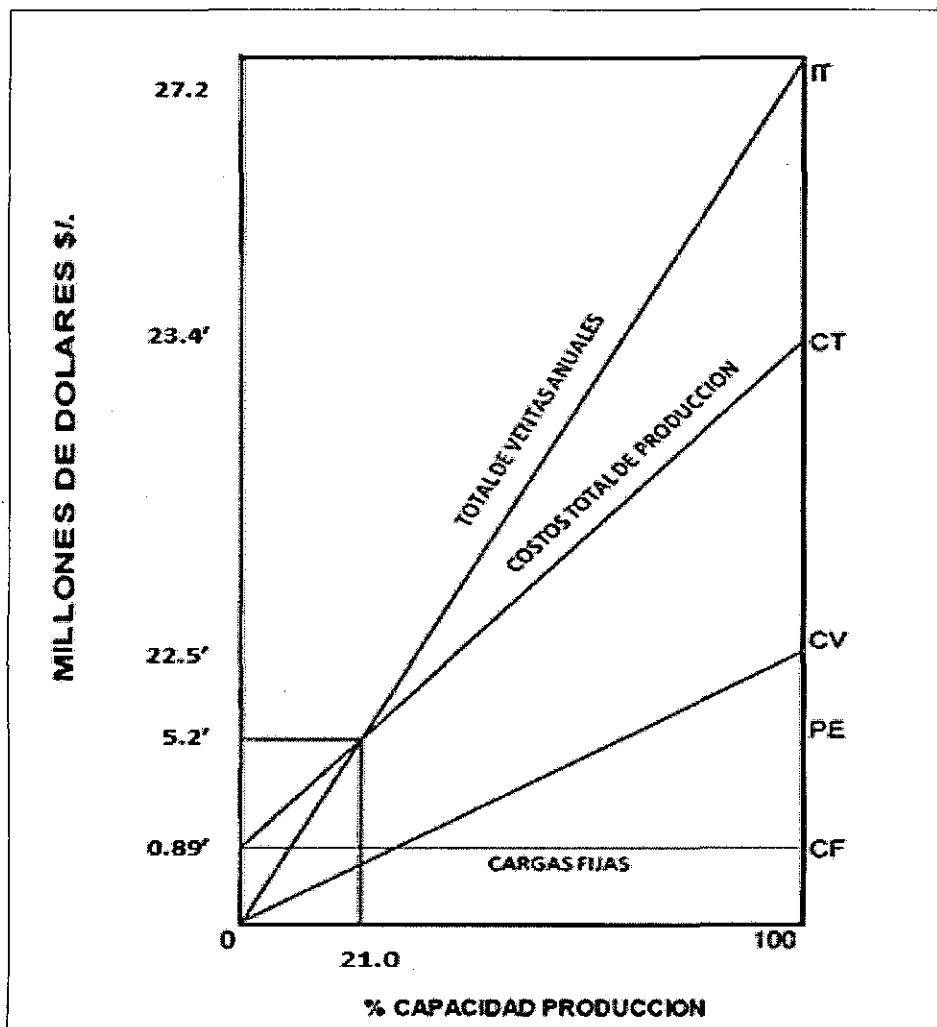
La estimación del costo total para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) en la planta química se detalla en la Tabla 2 correspondiente:

TABLA 2. COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN DEL ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA) EN PLANTA QUÍMICA		
ITEM	FACTOR	TOTAL
<b>1. COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS:</b>		
1.1 MATERIA PRIMA/REACTIVOS QUÍMICOS	CRM	\$18'307417.74
1.2 TRATAMIENTO DE RESIDUOS	CWT	\$24,600.00
1.3 SERVICIOS	CUT	\$1'960121.35
1.4 MANO DE OBRA	COL	\$187200.00
1.5 SUPERVISION	0.18*COL	\$33696.00
1.6 MANTENIMIENTO	0.06*FCI	\$270817.49
1.7 LABORATORIO	0.15*COL	\$28080.00
1.8 PATENTES	0.03*COM	\$480804.18
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS E INDIRECTOS		\$21'292736.76
<b>2. COSTOS FIJOS</b>		
2.1 DEPRECIACIÓN	0.1*FCI	\$451362.49
2.2 IMPUESTOS LOCALES	0.032*FCI	\$144436.00
2.3 GASTOS GENERALES DE PLANTA	0.7*COL+0.036*FCI	\$293530.50
TOTAL DE COSTOS FIJOS		\$889328.98
<b>3. GASTOS GENERALES:</b>		
3.1 COSTOS ADMINISTRATIVOS	0.177*COL+0.009*FCI	\$73757.02
3.2 DISTRIBUCION, MARKETING	0.11*COM	\$562948.65
3.3 INVESTIGACION Y DESARROLLO	0.05*COM	\$601340.30
TOTAL DE GASTOS GENERALES		\$1'238045.97
<b>COSTO TOTAL DEL PRODUCCIÓN</b>		<b>\$23'420111.72</b>

Fuente: Elaboración propia

La representación punto de equilibrio económico del proyecto de la planta química para producción del ácido poliláctico (PLA) se muestra en Gráfico 1 correspondiente:

Gráfico 1. Punto de equilibrio económico del proyecto



Fuente: Elaboración propia

A lo largo de la evaluación económica los indicadores financieros descritos han dado como resultado que la instalación de una planta química en el Perú para producción del biopolímero ácido poliláctico (PLA) es rentable económicamente dicho proyecto según se muestra en la Tabla 3 un resumen de los principales factores obtenidos:

TABLA 3. SUMARIO DE LA EVALUACION ECONÓMICA	
ITEM	VALOR OBTENIDO
INVERSIÓN TOTAL	\$7'812150.78
PRECIO DE VENTA DEL PRODUCTO (PLA)	\$523.4/TM
PUNTO DE EQUILIBRIO	21.0%
TASA MÍNIMA ACEPTABLE DE RENDIMIENTO (TMAR)	12.0%
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	\$17'840896.29
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	48.0%
RENTABILIDAD SOBRE LA INVERSIÓN (ROI)	623.2%
PERIODO DE RECUPERACION DE LA INVERSIÓN (PRI)	2años y 2 meses

Fuente: Elaboración propia